

2
2ej.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



DESINFECCION DEL AGUA POTABLE MEDIANTE LA CLORACION Y LA OZONIZACION

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL
PRESENTA

CESAR E. AGUADO VILLALBASO

MEXICO, D. F.

1987



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE GENERAL

	PP.
I.- Introducción	1
II.- Cloración	4
- Acción del cloro	5
- Cloración Residual Combinada	12
- Cloración Residual Libre	14
- Desinfección por Hipocloración	17
- Producción y Transferencia del Cloro	19
- Modos de Aplicación del Cloro	22
- Prueba de la Ortotolidina-Arsenito	30
III.- Ozonización	33
- Acción del Ozono	34
- Acción Esterilizante del Ozono	42
- Producción y Transferencia del Ozono	46
- Modos de Aplicación del Ozono	46
IV.- Análisis Comparativo entre el Cloro y el Ozono	68
- Cualidades del Cloro	69
- Cualidades del Ozono	72
- Ventajas en las Etapas del Proceso de Cloración	75
- Ventajas en las Etapas del Proceso de Ozonización	76
V.- Conclusiones	79
Bibliografía	

CAPITULO I
"INTRODUCCION"

INTRODUCCION

Además de su papel vital, el agua tiene un lugar importante en la agricultura y la industria. El desarrollo de la población aunado al crecimiento de la industria han contribuido a aumentar la demanda de agua. Por lo tanto, cada vez se requiere mayor cantidad de aguas superficiales, las cuales deben purificarse en función de su destino. En cuanto a las aguas subterráneas, éstas necesitan un tratamiento sofisticado cuando se destina para consumo humano.

Los distintos modos de purificación tienden a disminuir las materias orgánicas y minerales, pero también los microorganismos presentes, especialmente los patógenos. Es por esto, que las etapas de floculación, decantación, oxidación, filtración y desinfección se emplean usualmente tanto en el campo de las -- aguas potables como para las aguas de uso recreativo, industrial o aguas ya -- utilizadas.

El llevar a cabo una correcta potabilización, es una de las grandes preocupaciones de la Ingeniería Sanitaria. La rama de la Ingeniería Sanitaria, tiene, entre sus objetivos, esta finalidad, y para ello emplea varios métodos. De los métodos más usados para la desinfección de agua son: la cloración, que -- usa como agente activo para la desinfección, al cloro (de aquí el nombre del método) y, la ozonización, proceso en el cual el ozono es el elemento desinfectante activo.

El objetivo de esta tesis es comparar los dos métodos de desinfección del -- agua mencionados con anterioridad.

Los capítulos II y III están enfocados respectivamente, a la desinfección -- del agua potable por medio de la cloración y la ozonización. En los cuales se describe cada una de las etapas de los procesos de desinfección. La descripción detallada de cada uno de los métodos tiene como finalidad el proporcionar al estudiante una información en cuanto al tema y estar en posibilidad de realizar un buen fundamentado análisis de comparación.

En el capítulo IV se realiza propiamente el análisis comparativo entre el -- Cloro y el Ozono, se exponen las ventajas que ofrece cada una de las etapas de ambos métodos, así como la forma en que los elementos activos reaccionan en el agua y la forma en que se lleva a cabo la desinfección.

CAPITULO II

" C L O R A C I O N "

Acción del cloro.-

En el año de 1909, en los Estados Unidos de Norteamérica fue producido por primera vez, comercialmente, el cloro líquido. Su aplicación tuvo lugar - en la planta de filtración de Niágara Falls, empleando un equipo de cloración en el cual se disolvía un chorro de gas cloro en una corriente menor y se introducía como solución en el mayor volumen de agua, se le llamó - equipo Ornstein, debido a su inventor y fue instalado en plantas de tratamiento de aguas negras y agua natural.

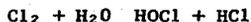
Una aportación importante para el desarrollo de esta técnica fue la instauración de la prueba de la ortotolidina, que se describirá más adelante, la cual determina el cloro residual y considera así la variación en la demanda del cloro residual y considera así la variación en la demanda de cloro de diferentes aguas. Su empleo se generalizó en el año de 1918.

El cloro es de color verde amarillento, existe, envasado en forma de gas y líquido, ya sea en alguna de estas formas o en alguno de los compuestos - que lo contienen, como; cloruro de cal, hipoclorito de sodio, CaCl_2 , se obtiene un activo desinfectante. Debido a su eficiencia, confiabilidad, bajo costo y facilidad de manejo, el cloro se usa en la mayoría de los sistemas de potabilización de agua.

El cloro es poco soluble en el agua pero al reaccionar con ella, es un -

agente químico muy activo, reacciona rápidamente con sustancias disueltas o suspendidas en el agua, de aquí la importancia de su dosificación, pues al reaccionar el cloro con esas sustancias se reduce su eficacia desinfectante. Así, una cantidad adicional de cloro será la que reaccione con la materia orgánica presente.

La reacción química del cloro con el agua es la formación del ácido hipocloroso y el ácido clorhídrico:



Las soluciones de agua clorada de este tipo, tienen un pH menor o igual a 3.0, forman soluciones concentradas a 500 p.p.m. ó más, por lo que se puede deducir que la adición de cloro al agua reduce la alcalinidad, es decir, la medición cuantitativa de los constituyentes alcalinos totales del agua, usualmente expresada en mg/Lt de CaCO_3 .

Se conoce técnicamente como cloro activo libre al cloro existente en el agua como ácido hipocloroso e iones de hipoclorito y produce las tres reacciones siguientes:

- La coagulación o cambio en el estado físico de los compuestos orgánicos.
- La oxidación de los compuestos orgánicos e inorgánicos.
- La combinación directa del cloro con las materias orgánicas e inorgánicas.

Las reacciones químicas que se producen, al agregar cloro al agua, considerando su intensidad, dependen del potencial de oxidación del cloro activo libre y de los compuestos de cloro que forma para desencadenar el proceso de cloración.

Se presentan casos en los que se requieren tan grandes concentraciones de cloro, que se necesita de una dechloración posterior para que no existan sabores ni olores de cloro en el agua y se precisa de mezclar cloruro de so-

dio, que produce bióxido de cloro, nombre por el cual se conoce a este procedimiento.

Antes del proceso de cloración propiamente dicho, puede llevarse a cabo - una precloración para evitar malos olores y sabores, destruir algunos microorganismos y algas, suprimir la descomposición de materias orgánicas en los sedimentos de los estanques de coagulación y evitar el crecimiento biológico en los filtros.

Las concentraciones de cloro residual libre, que se define más adelante, - que son eficaces para destruir la mayoría de los microorganismos, son de - 0.2 ppm a 1.0 ppm aunque es difícil mantener estas concentraciones en un - depósito grande y descubierto pues el cloro reacciona con la materia orgánica y es disipado por la luz solar. Para mantener estas concentraciones, se estabiliza la solución añadiendo amoníaco, el proceso siguiente es la cloración propiamente dicha.

Para garantizar el éxito de la desinfección, en un sistema de cloración, - deben considerarse los puntos siguientes:

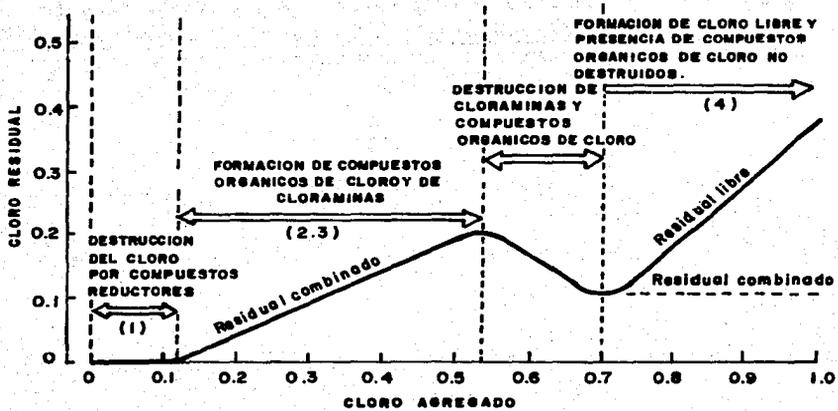
- El amoníaco, que al reaccionar con el cloro forma un compuesto con cualidades desinfectantes en que se basa la cloraminación, pero que es menos eficaz que el cloro libre.

El cloro residual de esta mezcla puede existir como compuestos clorados de materia orgánica y amoníaco, en cuyo caso se conoce como "cloro residual combinado"; puede estar presente como cloro libre y así se le conoce como "cloro residual libre", y puede estar combinado y libre, caso - conocido como "cloro residual total". Se puede concluir que la canti-dad requerida para producir un residual deseado después de un contacto definido en el tiempo, se llega al concepto de cloro suficiente.

Si se añade cloro en cantidad suficiente para que reaccione con todas - las sustancias reductoras, materia orgánica y el amoníaco, y luego se - agrega un poco más de cloro, éste último quedará como "cloro residual - libre disponible", considerado como el agente desinfectante más activo como se puede apreciar en la curva de demanda de cloro que se muestra - en la figura siguiente: (figura 2.1)

REACCIONES DEL CLORO EN EL AGUA.

Fig. 2.1



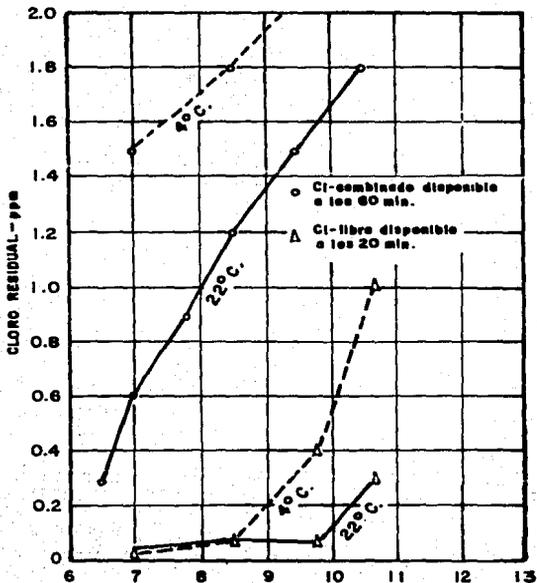
La cantidad de cloro que consumen las sustancias reductoras y la materia orgánica se conoce como demanda de cloro:

Demanda de cloro = cantidad que se agrega menos cantidad posterior - al período de reacción.

- El pH o concentración de iones hidrógeno que es un índice de la intencionada ácida o alcalina del agua, cuyo valor neutro es el 7.0 en la escala de 1 a 14, ha dado conclusiones valiosas, por ejemplo; las aguas - de baja alcalinidad y bajo pH, son más fácil de desinfectar, afortunadamente la mayoría de las aguas naturales tienen valores entre 5.5 y 8.5 de pH.
- A un pH de 6.5 y una temperatura de 21°C, 0.3 mg/Lt de cloro residual - combinado causa un efecto letal de 100% de las bacterias pero a medida que el pH es mayor y a la misma temperatura se debe aumentar la concentración de cloro residual combinado, por ésta y otras causas, que veremos más adelante, la cloración residual libre se ha adoptado con una - eficiencia superior a la combinada, en tiempo, temperatura, volumen y - costo.
- La materia orgánica, es un factor importante a considerar pues el reaccionar con el cloro le reduce sus propiedades desinfectantes.
- Los nitritos, que eliminan el cloro libre y pueden producir un color - falso en la prueba de la ortotolidina.
- El hierro y el manganeso, también son causa de error en la lectura de - la prueba, ya que reaccionan fuertemente con el cloro y provocan una demanda adicional de cloro.
- Los sólidos suspendidos protegen a las bacterias, ésto se puede evitar mediante la floculación y la sedimentación.
- El manganeso, produce colores falsos para la prueba OTA.
- Tiempo y Temperatura; factores que consideran la duración del período - de reacción disponible para la desinfección y la cantidad de cloro residual. Se relacionan, pues la rapidez de la desinfección es proporcional a la temperatura del agua. Si se suponen constantes los demás factores, se tiene una cloración más eficaz entre más alta sea la temperatura del agua. (Ver figuras 2.2 y 2.3)

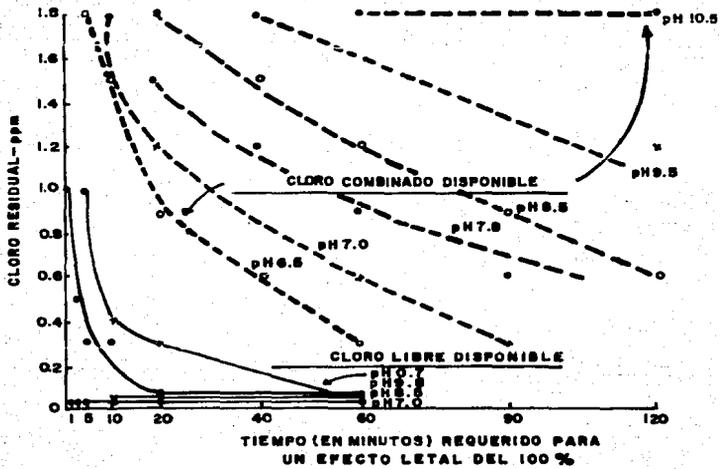
EFFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE EL CLORO RESIDUAL

Fig. 2.2



EFEECTO DE LA CLASE DE CLORO RESIDUAL Y EL TIEMPO

Fig. 2.3



Después de haber tomado en cuenta todos los factores anteriormente mencionados, se pasa a evaluar el sistema de cloración más eficaz y económico al abastecimiento.

Se ha comprobado la eficiencia de la cloración desde hace 50 años, progresando en las medidas de control para que sea satisfactoria, siempre produciendo un residuo de cloro en el agua tratada y en función de éste residuo conocemos los dos principales tipos de cloración: cloración residual combinada, también conocida como simple o marginal y como cloraminación, pues se anexa el tratamiento con amoníaco, que limita los malos olores y sabores. El otro tipo es la cloración residual libre.

Su diferenciación se basa en las dos formas en que el cloro residual disponible, puede presentarse como cloro activo combinado y cloro activo libre, la exactitud de su determinación exacta se debe a la prueba de ortotolidina-arsenito.

Cloración Residual Combinada.-

Consiste en la aplicación de cloro al agua para producir con el amoníaco natural o agregando un residuo de cloro activo combinado y mantener este residuo en el sistema de distribución, sin contenido de cloro activo libre.

Pese a que el cloro activo combinado es menos activo que el cloro activo libre, su velocidad de reacción lenta es favorable en ciertas situaciones como en estanques grandes de agua cuya temperatura sea fría. Su bajo potencial de oxidación implica que su acción bactericida sea más lenta y por ello se requieran mayores cantidades de este cloro en las mismas condiciones que cloro activo libre, cuantitativamente, unas veinticinco veces más.

Este sistema se utiliza más bien como postcloración, aplicación del cloro después de un proceso de tratamiento como la filtración o la rechloración, aplicación de dosificaciones de cloro en exceso a las requeridas para de-

sinfección, para proporcionar un residuo permanente en el sistema de distribución.

Para lograr este residuo, es necesario analizar las propiedades del agua - para verificar si en ella existe amoniaco o debe agregársele. De esta forma, si el agua contiene siempre amoniaco libre, para mantener el residuo - de cloro activo combinado en la dosis adecuada, solo se tendrá que añadir cloro. En caso contrario, deben añadirse el cloro y el amoniaco. Por último, si el agua posee cloro activo libre, simplemente se añade amoniaco.

Este tipo de cloración, fue muy utilizada en los años de 1916 a 1945, pues se obtenía un residuo de cloro más estable, que limitaba el sabor indeseado a cloro del agua. Por motivos que se mencionarán más adelante, la cloración residual libre acaparó los procedimientos a seguir últimamente, dadas sus ventajas técnicas y económicas.

Sin embargo, es necesario mencionar que para el control de calidad de esta cloraminación o cloración residual combinada, se exige una proporción óptima entre el cloro y el amoniaco de 3 a 1 respectivamente, para asegurar la presencia del amoniaco.

La cloración residual combinada produce residuos de cloro que son del tipo de cloramina y proporcionan muy poco cloro activo libre; éstas cloraminas formadas por la combinación del cloro y del amoniaco, se pueden presentar de 3 maneras:

- Monocloramina NH_2Cl
- Dicloramina NH Cl_2
- Tricloruro de nitrógeno NCl_3

La química de las cloraminas está en función del valor del exceso de amoniaco y del pH del agua.

Antes de pasar a estudiar la cloración residual libre, es conveniente hacer la siguiente comparación:

Para efectuar la esterilización en un % aceptable, deberán asignarse cantidades definidas de cloro residual, durante periodos de tiempo limitados, que varían dependiendo con la temperatura y el pH del agua; analizando el caso de turbiedad nula con pH neutro (7.0) y de 20°C de temperatura.

La mencionada esterilización, requería para obtenerla en el mismo período de contacto y añadiendo la misma cantidad de cloro residual activo combinado y de cloro residual activo libre, de casi 100 veces más de tiempo con el primero y de 25 veces más en volumen comparado con el segundo.

En cualquiera de los 2 sistemas se puede producir residuos excesivos de cloro que requieran de la dechloración, o sea la reducción total o parcial del cloro residual en el agua, por tratamiento químico o físico, como el dióxido de azufre y sus derivados, el carbón activado, la aereación sumergida o de rocío.

Como es de suponerse, la función económica que llegan a desempeñar estos dos sistemas de cloración es muy importante, para evitar sobretreatamientos costosos es necesario conocer estos aspectos.

Cloración Residual Libre.-

Es la aplicación del cloro al agua para producir directamente o mediante la destrucción del amoníaco o de ciertos compuestos orgánicos nitrogenados un cloro residual libre, que como ya vimos es la porción de cloro residual que queda en el agua después de un período de contacto definido, que reaccionará química y biológicamente como ácido hipocloroso (HOCl), o como hipoclorito (HCl).

La porción de cloro residual total que sea libre, sirve como medida de la capacidad para oxidar la materia orgánica; se recomienda en la práctica - que por lo menos, el 85% del cloro residual total quede en estado libre.

Para determinar el efecto bactericida del residuo de cloro activo libre es necesario analizar la composición del residuo. El ácido hipocloroso (HOCl) es el residuo de cloro activo libre más eficaz en la desinfección de aguas.

Han sido esbozadas las propiedades de los 2 tipos de cloración más comunes en el medio, pero es hora de resumir los puntos claves por los que la cloración residual libre ofrece ventajas más prácticas y económicas sobre la cloración residual combinada, limitada ésta al caso de la contaminación por de sechos industriales que contengan fenol o incidan sobre un abastecimiento de agua potable.

Mencionado así, las principales ventajas de la cloración residual libre ten dramos:

- Mayor facilidad de control.
- Puede emplearse en todos los puntos de aplicación, o sea en la precloración, la cloración simple, la postcloración y la recloración.
- Con un tiempo de contacto adecuado, elimina las sustancias oxidadas de manganeso, hierro y proteínas.
- No es necesario variar la cantidad de cloro residual con cambios en el pH con valores de 6.0 a 8.0, como en el caso de la combinada al aumentar el pH.
- Disminuye el crecimiento biológico en los filtros.
- Provoca una sensible mejoría en cuanto a olores y sabores se refiere.
- Evita reducciones en las líneas de distribución.
- Con un período de tan sólo 10 minutos y con 0.2 mg/lt, se consigue una desinfección tan efectiva como la que logra el cloro residual combinado en 60 minutos y además con 1.0 mg/lt de él.
- No es necesario modificar sensiblemente el cloro residual al variar la temperatura, como el cloro residual combinado, que requiere mayores volúmenes al bajar la temperatura.
- En la recloración, se eliminan las bacterias resistentes al cloro, destruyendo así cualquier probable crecimiento posterior en

el sistema de distribución.

Si el agua no contiene amoníaco libre, la adición de cloro será suficiente para proporcionar el residuo de cloro activo libre; en caso contrario se debe destruir la segura formación de un residuo de cloro activo combinado, aplicando una cantidad en exceso de cloro de manera que el residuo que que de conste de más de 85% de cloro activo libre.

El control que se utiliza para indicar si las reacciones químicas y biológicas han sido completas en el proceso de cloración, es la prueba de ortotolidina-arsenito (OTA), pues mide y distingue cuantitativamente los residuos del cloro libre y combinado.

Anteriormente era utilizada la yodometría o el arsenito de sodio, también el método colorimétrico, debido a la gran actividad química del cloro que libera al yodo de sus sales e indica por coloraciones la presencia de cloro libre residual. Fue hasta 1940 que se comenzó a emplear el método de la ortotolidina, compuesto orgánico que en solución ácida reacciona con el cloro y produce un color verde amarillo cuya intensidad de color, depende de la concentración del cloro, que por pequeña que sea, es sensible hasta 0.05 p p m. Con concentraciones superiores a 2.0 p p m el aumento de la intensidad del color con aumentos importantes de la concentración de cloro no es perceptible a simple vista, pero hasta en esos niveles es efectiva - la prueba de la ortotolidina.

La reacción de la ortotolidina al cloro y al ácido se ha elaborado para dar un desarrollo máximo al color con el menor tiempo de reacción, dichas reacciones deben observarse con mucho cuidado para obtener los resultados deseados.

Algunas objeciones técnicas estriban en que los nitritos, el manganeso y el hierro férrico reaccionan y perturban el color, provocando confusiones y darán por lo tanto un valor de cloro residual superior al real.

Se evita este problema eliminándolos antes de la cloración, lo cual no es

difícil con la técnica moderna, que utiliza la aereación, sedimentación, - filtración.

Actualmente, para control de laboratorio se añade arsenito de sodio al agua a ser analizada antes de la ortotolidina, lo que, permite neutralizar a todos los compuestos de cloro en el agua y cualquier formación de color amarilla, debida a las sustancias perturbadoras. Así son determinadas las interferencias de nitritos de hierro y manganeso, sin afectar la determinación precisa del cloro residual. De esta adición toma su nombre la prueba ortotolidina con arsenito-OTA.

Anteriormente, la reacción que se practicaba únicamente con ortotolidina y un bajo valor de pH, que producía el color amarillo verdoso, hacía imposible diferenciar entre el cloro activo libre y el cloro activo combinado, - ya que la reacción del cloro activo libre con la ortotolidina es instantánea y el color se produce en menos de 5 segundos.

La aparición de este color inmediato puede considerarse como medida de cloro activo libre. A temperaturas inferiores a 15.6°C las cloraminas y - otras formas de cloro combinado reaccionan lentamente con la ortotolidina y éste hecho se empleaba rudimentariamente para distinguir cualitativamente la presencia de los cloros estudiados.

Debido al fenómeno anterior, en la prueba OTA, la adición del arsenito de sodio reductor, debe hacerse en menos de 5 segundos después de haber puesto la ortotolidina en la muestra. Así se detiene el desarrollo del color debido al cloro combinado, sin que palidezca el color causado por la combinación inmediata del cloro libre con el indicador y se puede hacer la comparación con las normas de colores permanentes.

Desinfección por Hipocloración.-

Este método toma su nombre por el empleo del hipoclorito de calcio o el hipoclorito de sodio.

Se agrega en forma de polvo, variando su concentración desde el 3 al 15% - de cloro disponible en peso. El hipoclorito de calcio o cloruro de calcio contiene hasta 35% del cloro disponible en peso, siendo muy estable en lugares oscuros y frescos. Estas soluciones de hipoclorito se diluyen en concentraciones de 0.5 a 1.0% en peso, considerando el contenido de cloro de la solución concentrada; de esta forma, si queremos preparar 150 litros al 1.0% usando hipoclorito de calcio con un 30% de cloro disponible, entonces el peso del hipoclorito de calcio necesario es de:

$$W = (150 \times 0.01) / 0.30 = 5.00 \text{ kg de CaOCl}_2$$

La forma más común de agregar las soluciones de hipoclorito se hace mediante una bomba de diafragma para soluciones o por tanques de presión.

Para el tratamiento de agua que fluye a gasto unitario, como es el caso - del bombeo, el tipo de equipo adecuado, es el que se controla manualmente; en caso contrario se requiere del uso de un hipoclorador de alimentación proporcional controlado con un medidor de régimen.

Aunque la condición principal es siempre la de satisfacer holgadamente la demanda de cloro mediante los diferentes equipos de cloración.

Los cuartos en los cuales se ubiquen estos equipos deben de ser frescos, - limpios, accesibles y preferentemente deben ser dobles, para entrar en acción en el eventual caso de una emergencia.

Algunos instrumentos y equipo que no deben faltar en dichas casetas son: Máscaras de gas, básculas, juntas, empaques, herramientas, válvulas reguladoras, bombas, tubos medidores, etc., solo así se llevará una cloración - adecuada y se estará preparando para resolver alguna fuga o emergencia que se presente.

Producción y Transferencia del Cloro.-

Como ya se mencionó el cloro es un elemento gaseoso del grupo de los halógenos, muy venenoso, de color verde amarillo, mas pesado que el aire y de olor sofocante; tan activo como el oxígeno, se combina con todos los metales y metaloides, por lo cual no se encuentra libre en la naturaleza, pero sus compuestos son abundantes (inclusive la sal común, NaCl); el principal método de preparación comercial es la electrólisis del cloruro de sodio.

El cloro es obtenido, por la electrólisis de una solución de cloruro sódico, utilizando electrodos de carbón. El cloro se libera en el ánodo (electrodo positivo), mientras que el sodio se deposita en el cátodo (electrodo negativo). Sin embargo, el sodio es tan reactivo que se combina allí con el agua; se libera hidrógeno, y se forma, simultáneamente, hidróxido sódico.

También se puede obtener el cloro por oxidación de ácido clorhídrico; los iones hidrógenos se oxidan a agua, con lo que queda libre el elemento cloro. La forma normal de realizar la reducción consiste en calentar bióxido de manganeso con ácido clorhídrico concentrado. Aunque el gas es soluble en agua, se puede recoger sobre una solución concentrada de cloruro sódico.

El transporte y envasado del cloro se hace por medio de recipientes cilíndricos de acero de diversas capacidades (100, 150, 500 y 2000 PSI). El cloro carece de peligrosidad estando cerrado el recipiente que lo contiene, pero si se maneja sin precaución, puede causar graves daños a personas y equipo.

Los cilindros, en los cuales es envasado y transportado el cloro, son forjados en una sola pieza de metal de acero sin costura y con una válvula en el cuello de la botella provista de una capucha protectora cuyo tapón de seguridad se funde a 75°C para evitar que estalle el cilindro en caso de incendio.

De lo anterior, es claro el riesgo que significa golpearlos o dejarlos caer, evitando por ello, el uso de grúas para desplazarlos, adoptando el uso de carretillas elevadoras montadas sobre neumáticos.

Si el equipo de alimentación de cloro, (cloradores), se encuentra a una distancia considerable de los depósitos de cloro, se debe instalar una serie de válvulas de cierre cerca de los cloradores para tener un mayor control y así evitar accidentes. Dichas válvulas deben ser especialmente diseñadas para cloro.

Debido a que el cloro es más pesado que el aire, se debe buscar una ventilación adecuada de el lugar donde se encuentre el cloro, y disponer de mas carillas contra gases de cloro, en cantidad suficiente para el caso de com posturas o fugas, éstas últimas se pueden detectar con un trapo empapado de amoníaco, que producirá al contacto con el gas cloro un vapor blanquizo que indicará el punto exacto de la fuga, punto que nunca debe ser trata do con agua pues en lugar de dar un buen resultado, empeoraría la situación.

Con estos principios elementales y para tener un panorama más completo, se hará referencia a las recomendaciones de la Asociación Nacional Norteamericana de Plantas de Tratamiento de Agua:

- El manejo del cloro debe llevarse a cabo únicamente por personal especialmente capacitado para este efecto.
- Evitar cualquier tipo de golpes a los envases del cloro.
- Mantener los envases de cloro a una temperatura moderada, alejados de tuberías de vapor, del fuego y alimentadores eléctricos de alta tensión.
- No conectar nunca un envase lleno a un cabezal de distribución unido a otros envases, sino hasta que las condiciones de temperatura y presión sean las mismas.
- Cuando los envases estén vacíos o no estén en servicio, deben colocárseles los capuchones de protección en las válvulas.

- Cerrar la válvula del envase cuando quede vacío.
- Nunca se deben volver a llenar los envases excepto cuando se lleve a cabo una supervisión técnica.
- No emplear nunca un envase para otro uso que no sea para contenido de cloro; evitando así mezclar gases, aire o humedad.
- Nunca utilizar los envases como soportes o apoyos.
- Nunca debe aplicarse una llama o usar un soplete a un envase.
- Deben conservarse las válvulas cerradas todo el tiempo en todos los envases, salvo el caso en que estén dejando pasar cloro.
- Se considera como ilegal el hecho de transportar un envase con fuga o defectuoso.
- Revisión diaria de los envases que contengan cloro.
- Eliminar los esfuerzos de flexión en las terminales o las uniones de los tubos flexibles de conexión.
- Contener las casetas, el equipo adecuado para cualquier eventualidad.

Modos de Aplicación del Cloro.-

Los dispositivos encargados de proporcionar el cloro a los sistemas de abastecimiento de agua potable, son los cloradores y consisten en; diversas combinaciones de válvulas de reducción de presión que funcionan por medio de diafragmas mecánicos o flotadores que operan hidráulicamente, medidores para cuantificar el gasto del cloro gaseoso después de que se ha reducido a una presión uniformemente baja y dispositivos para hacer una solución acuosa del gas e inyectar esta solución al agua por desinfectar. De esta manera funcionan, en general, los cloradores de solución. Ya que el cloro, en estado gaseoso, puede comprimirse hasta licuarse, se puede transportar y conservar en envases de acero, facilita a los dispositivos su funcionamiento, conservación y las reparaciones menores así como, hacer los ajustes necesarios.

En lo dicho anteriormente se puede basar el diagrama de flujo de un clorador que abarca las funciones elementales de un equipo común. (figura 2.4)

El cloro envasado existe en forma de gas, líquido o ambos. El gas y el líquido existen en estado de equilibrio para todas las condiciones de temperatura y presión en la curva de la figura 2.5; si los valores están encima de la curva, el líquido se transforma en gas; inversamente, si los valores están por debajo de la curva todo gas se condensa.

Cuando el cloro en estado gaseoso se extrae de un envase; la presión interior disminuye y se pierde calor, el cual, debe ser repuesto desde alguna fuente exterior. Así a una temperatura moderada, un envase lleno entregará el cloro a un ritmo más rápido que cuando está parcialmente lleno y garantiza a 21°C la entrega de 30 libras (13.6 kg) cada 24 horas con un cilindro de 150 libras (68 kg). Por lo general en sistemas de abastecimiento se usan recipientes de 68 ó 907 kg.

En cuanto a temperatura se refiere, concluimos con dos reglas básicas:

- La temperatura de los cilindros de cloro, de los envases de -

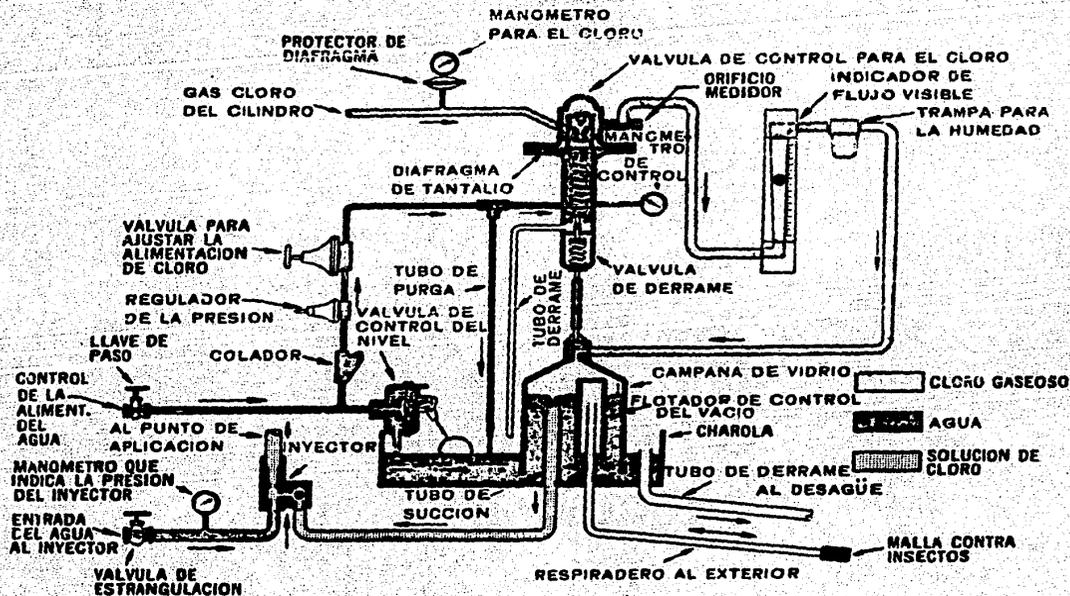
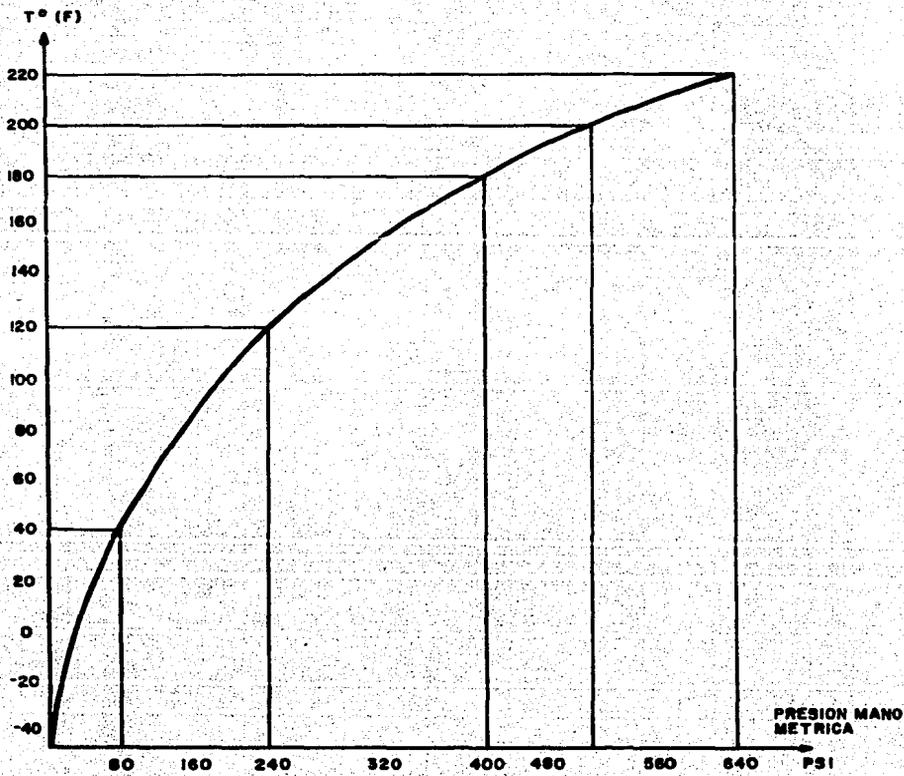


DIAGRAMA DE FLUJO DEL CLORADOR

Fig. 2.4

**CURVA DE TEMPERATURA Y PRESION
PARA CLORO LIQUIDO**
Fig. 2.5



907 kgs. y de las líneas de conducción del gas, deben permanecer a una temperatura inferior a la del clorador para evitar la relicuefacción del gas.

- Evitar fuentes de calor que excedan de 52°C.

Es conveniente diferenciar los dos tipos de cloradores en existencia ya que unos alimentan a presión los aparatos que controlan la aplicación del gas cloro y otros requieren del vacío.

Los sistemas de alimentación a presión consisten de una válvula reductora y compensadora de presión, pudiendo así obtener una baja constante de presión a través de un orificio controlando de esta forma las variaciones de presión en los cilindros de cloro debidos a cambios de temperatura.

También ejercen un control exacto del gasto de salida de cloro, que como sabemos tienen aplicación directa del gas en el punto de tratamiento deseado.

En cualquiera de los dos casos, los aparatos del tipo a presión se basan en los mismos principios.

Los cloradores de alimentación en solución del tipo de vacío se basan en principios totalmente diferentes de operación a los de presión. Su construcción se ha simplificado con el avance tecnológico. La construcción de ellos es por tanto más económica.

Las presiones del cloro son reducidas al punto de operación deseable sin emplear válvulas de regulación mecánicas ni compensadores de diafragma. La caída de presión a través de un orificio calibrado que controla la salida del cloro puede variarse ajustando el vacío en el lado de salida del medidor. Así el cloro está en un vacío parcial o carga negativa desde que entra en la cámara de vacío, hasta que se mezcla con la pequeña corriente de agua así como cuando se descarga del clorador. Debido a esta presión negativa en todos los puntos más allá de la válvula de entrada y

hasta el inyector de descarga, la posibilidad de que se produzca una fuga de cloro es menor que en un clorador de presión total. Automáticamente cesa la corriente de gas cloro, en caso de fallas en la cámara de vacío o en el suministro de agua. Un ejemplo de este tipo de clorador es el Notch VI, serie A-741 de Wallace & Tiernan Division, que ha tenido gran aceptación en el mercado nacional por adaptarse fácilmente a nuestros sistemas, ser de bajo costo y requerir de un sencillo mantenimiento. Está fabricado con materiales resistentes a la corrosión, controla el flujo del cloro con el famoso orificio variable Notch V. Sus capacidades varían de entre 3 a 200 libras de cloro por cada 24 horas. La velocidad de alimentación del clorador es controlada manualmente. (figura 2.6)

Este dispositivo produce excelentes resultados en aguas sometidas a un tratamiento uniforme y continuo o para flujos intermitentes. Se obtiene un buen rendimiento, el orificio Notch V da mayor efectividad, amplitud y facilidad de hacer reparaciones que otros dispositivos para el control de agua y gas cloro. Consiste en una ranura obturadora deslizante en un anillo ajustado. Esto redundando en un estilo de orificio exacto para altos rendimientos. Repitiendo la posición de la obturación se duplica el funcionamiento del orificio. Un giro de una pulgada a la ranura se compara con una fracción de pulgada para válvulas convencionales de modo que, un movimiento relativamente largo en la ranura obturadora da un menor cambio en el promedio del fluido, esto optimiza una relación definida entre la posición de la ranura y el promedio del fluido, lo que hace que se lleven a cabo más fácilmente los finos ajustes. El rango de mediación es de 20 a 1. El clorador Notch V está hecho de un plástico autolubrificante y resistente a la corrosión.

La operación de cloradores por presión negativa (vacío) asegura la entrada positiva del gas cloro bajo cualquier situación anormal, aún si un rotámetro se llega a romper, el sistema de presión negativa, deja aire suficientemente mayor al que salió.

El diafragma y las válvulas check de bola en el inyector proveen la alimentación del clorador. La presión del cloro y la regulación de vacío por válvulas, tienen unidades permanentemente fijas al diafragma para añadir seguridad.

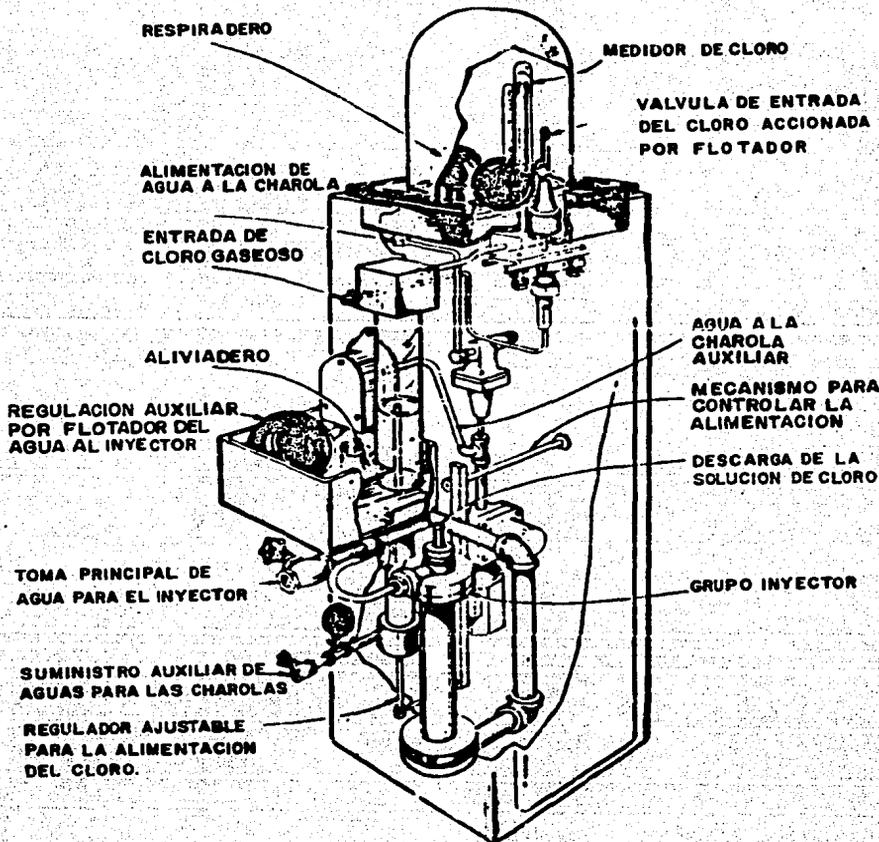


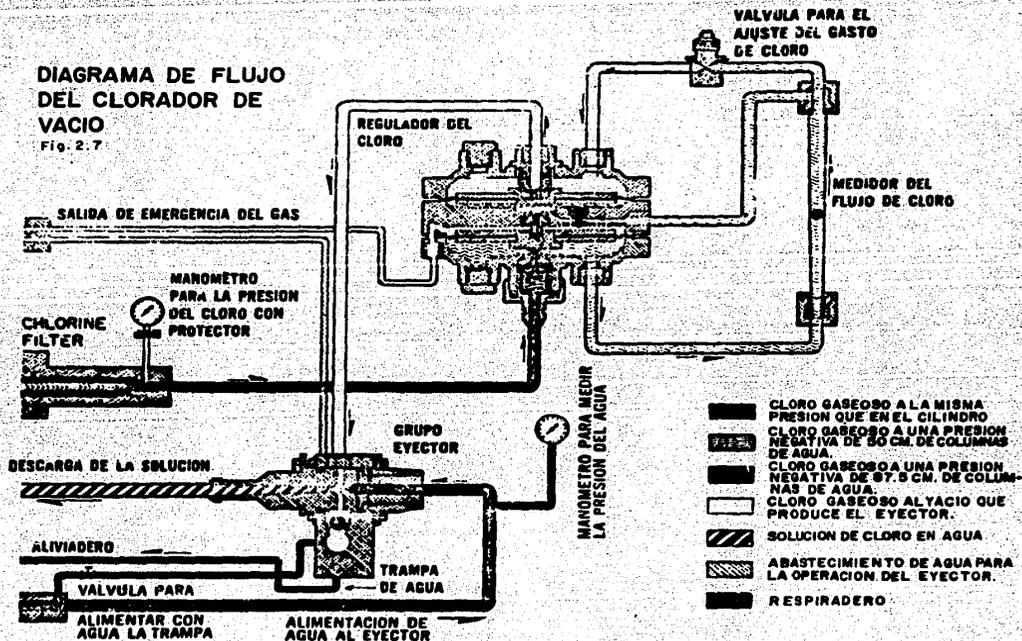
DIAGRAMA DE FLUJO DEL CLORADOR (W&T)

Fig. 2.6

El recorrido del gas dentro de un clorador de vacío es: primero entra a través de una válvula reguladora aliviadora de presión. Esta válvula operada por un diafragma mantiene el vacío propio operante adelante del Notch V., - luego el gas pasa a través del rotámetro al orificio variable Notch V. - Aquí el nivel de alimentación es cambiado manualmente colocando el tornillo del Notch V en su anillo, cambiando el área del orificio. Este sistema man tiene el nivel de alimentación dentro del 4%, después del orificio, el gas pasa a través de una válvula aliviadora reguladora de vacío, también admite aire para aliviar el vacío cuando el cloro es expulsado, este aire no pasa a través del rotámetro, este aparato sólo indica el gasto del gas. Dentro del inyector, el gas medido es disuelto en agua. La solución resultante es descargada en el punto de aplicación. Una válvula check con diafragma (la - cuál cierra la succión del inyector cuanto éste no está operando), y una - válvula check de bola forman parte del inyector; previenen el regreso del - flujo de agua dentro del clorador. (figura 2.7).

DIAGRAMA DE FLUJO DEL CLORADOR DE VACIO

Fig. 2.7



-  CLORO GASEOSO A LA MISMA PRESION QUE EN EL CILINDRO
-  CLORO GASEOSO A UNA PRESION NEGATIVA DE 80 CM. DE COLUMNAS DE AGUA.
-  CLORO GASEOSO A UNA PRESION NEGATIVA DE 97.5 CM. DE COLUMNAS DE AGUA.
-  CLORO GASEOSO AL VACIO QUE PRODUCE EL EYECTOR.
-  SOLUCION DE CLORO EN AGUA
-  ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA LA OPERACION DEL EYECTOR.
-  RESPIRADERO

Prueba de la ortotolidina-arsenito.-

Propósito de la prueba.

Cuando se agrega cloro al agua, reacciona con sustancias orgánicas y otras que destruyen su poder desinfectante. Por este motivo se necesita agregar una cantidad de cloro que sea suficiente para que reaccione con todas las diversas sustancias y aún quede un exceso o cantidad residual. En el control de la cloración es importante saber si el cloro residual queda como cloro libre o como cloro combinado, que es una forma menos activa.

La prueba de la ortotolidina-arsenito (OTA), puede usarse para este propósito. Esta prueba mide el cloro residual libre, tal como se emplea para lograr una desinfección más efectiva o para destruir los sabores y olores. También mide el cloro residual combinado, cuando se practica la cloraminación o cuando el amoníaco está presente naturalmente en el agua. Además mide los cloros residuales libre y combinado, cuando ambos están presentes como resultado de una destrucción parcial de la materia orgánica por el cloro.

Principio de la prueba. OTA.

Cuando se agrega el reactivo de ortotolidina a una agua que contiene cloro, se desarrolla un color amarillo verdoso cuya intensidad es proporcional a la cantidad de cloro residual presente. El cloro residual libre reacciona en forma prácticamente instantánea con la ortotolidina, requiriéndose menos de 15 segundos para que se desarrolle el color. El cloro residual combinado, reacciona en forma relativamente lenta con la ortotolidina, requiriéndose 5 minutos a 21°C para que se desarrolle completamente el color. En esta forma la presencia o ausencia de un color inmediato o instantáneo, indicará la presencia o ausencia de cloro residual libre. Este color instantáneo puede determinarse cuantitativamente, si se agrega a la muestra, antes de los 15 segundos de agregada la ortotolidina, un agente reductor débil como es el arsenito de sodio. Este neutraliza al cloro combinado antes de que pueda reaccionar con la ortotolidina. El color instantáneo no es afectado por el reactivo de arsenito de sodio y puede compararse

se con los patrones permanentes en cualquier momento dentro de los 5 minutos siguientes.

Como los patrones permanentes se preparan para semejar los colores debidos al cloro en una agua incolora y libre de turbiedad y de sustancias interferentes, debe hacerse una corrección por estos constituyentes en la muestra, cuando se hace una comparación del color. Esto se logra usando una prueba testigo a la cual se agrega primero el arsenito de sodio, destruyéndose así todo el cloro residual, y después se le agrega el reactivo de ortotolidina, que puede o no desarrollar un color debido a las sustancias interferentes como el manganeso. Si el cloro residual libre se determina midiendo la diferencia de colores entre la porción de prueba y la porción testigo, la interferencia se presentará en las dos porciones y así no afectará a la prueba.

Si se agrega el reactivo de ortotolidina a otra porción de la muestra y se deja reaccionar durante 5 minutos, se desarrollará un color debido tanto al cloro residual libre como al combinado y así la diferencia entre esta porción y la anterior puede determinarse por comparación con los patrones permanentes y obtenerse la cantidad de cloro residual combinado. En este caso no se necesita un testigo, pues las interferencias se presentarán en ambas porciones de la prueba.

Empleando las lecturas obtenidas de las tres porciones antes descritas, es posible medir el cloro residual libre y el cloro residual combinado. La porción de muestra a la que se agregó primero el reactivo de ortotolidina e inmediatamente después el reactivo de arsenito (celda A), produce un color que representa al cloro residual libre, más el debido a las sustancias interferentes que pudiese haber. En la porción de muestra a la que se agregó primero el arsenito y luego la ortotolidina (celda B) se desarrolla un color que es debido únicamente a las sustancias interferentes. En esta forma, el cloro residual libre puede determinarse por medio de la diferencia de lecturas entre la celda A y la celda B. El cloro residual combinado puede determinarse mediante la diferencia de lecturas entre la celda OT (aquella en que se dejó desarrollar el color de la ortotolidina sola, por 5 minutos) y la celda A.

Muestreo.-

Las muestras deben recolectarse en frascos limpios y también deben estar limpias las celdas que se usen para las pruebas, pues de lo contrario cualquier suciedad en el vidrio reaccionará con el cloro, dando resultados bajos. De ser posible, las muestras deberán recolectarse en un punto en donde el cloro haya estado en contacto con el agua por 10 minutos cuando menos. Si esto no es posible, deben dejarse reposar las muestras durante el tiempo suficiente para completar los 10 minutos de contacto.

Interpretación.-

El poder desinfectante del cloro depende de la forma en que esté presente el cloro residual, del tiempo de contacto, de la temperatura y del pH del agua. Si el pH es menor de 8.0, un cloro residual libre de 0.2 mg/Lt destruirá las bacterias en un período de contacto de 10 minutos, a cualquier temperatura. Para lograr los mismos resultados con cloro residual combinado, se necesita que sus concentraciones sean de 1.0 mg/Lt a un pH de 6.0, de 1.5 mg/Lt a un pH de 7.0 y de 1.8 mg/Lt a un pH de 8.0 y se mantengan así durante un período de contacto de 60 minutos, debiendo variarse las concentraciones según varíe la temperatura del agua tratada.

CAPITULO III

" O Z O N I Z A C I O N "

Acción del Ozono.-

El interés que presenta el ozono para la desinfección de agua, procede tanto de sus características oxidantes, especialmente enérgicas que son aprovechadas para degradar o eliminar ciertas sustancias orgánicas o minerales indeseables, como de su excelente poder bactericida y virulicida.

La acción oxidante del ozono puede presentar 3 formas diferentes:

- Oxidación directa por pérdida de un átomo de oxígeno.
- Oxidación directa por adición de la molécula de ozono en el cuerpo oxidado. Esta es la primera fase del proceso convencional de ozonólisis.
- Oxidación mediante efecto catalítico que favorece la función oxidante del oxígeno que le acompaña en el aire ozonado.

En el primer caso se obtienen reacciones sumamente enérgicas pero comparables a las obtenidas con otros oxidantes más comunes.

En el segundo caso, se observa la formación de ozónidos especialmente cuando se provee la acción del ozono en los compuestos no saturados que poseen dobles enlaces. Esta formación es muy importante, los ozónidos son generalmente inestables y al destruirse producen un desdoblamiento químico de la molécula orgánica, desdoblamiento que explica la eficacia de la ozonización, si

por ejemplo, se le compara con la del cloro. Se han propuesto, especialmente por investigadores de la Universidad de Texas, cierto número de esquemas concernientes a la formación y destrucción de los ozónidos. Parece ser que es en el seno de los solventes ionizantes, de los que el agua forma parte, donde la estabilidad de los ozónidos es más débil. También se ha observado que tanto elevadas concentraciones de ozono como tiempos de ozonización prolongados, originan la descomposición de los ozónidos más estables.

Por último, en la acción catalítica, el oxígeno, presente simultáneamente con el ozono es el oxidante principal, ya que la oxidación se produce a temperaturas más bajas y a una velocidad mayor que en presencia del oxígeno o del aire únicamente. Contrariamente a lo que ocurre en muchas catálisis, el ozono, agente catalítico, no se encuentra intacto después de la operación, debido a la especial propiedad de autodestrucción de este cuerpo.

Las reacciones de adición y la acción catalítica son especialmente interesantes en el tratamiento de aguas. Numerosos cuerpos, tanto minerales como orgánicos son sensibles a la acción del ozono, incluso en las especiales condiciones de empleo impuestas (en frío y en medio diluido). Entre estos cuerpos destructibles o eliminables por ozonización, podemos citar los siguientes: los contaminantes convencionales (hierro, manganeso, materias húmicas, proteínas y ácidos aminados), los compuestos responsables del deterioro del sabor, del color o del olor de las aguas, los cuerpos considerados microcontaminantes orgánicos (detergentes, sustancias extraíbles mediante cloroformo, fenoles, hidrocarburos y quizá pesticidas). Además, el ozono posee un poder bactericida y virulicida importante, con la reserva de ser aplicado en un coeficiente cuyo resultado sea la formación de un residual libre superior a un valor límite y ello durante un tiempo suficiente. La oxidación catalítica es la que destruye directamente las proteínas y los aminoácidos y proporciona una cómoda explicación de las propiedades bactericidas y virulicidas enérgicas del ozono.

Los efectos de la ozonización pueden ser sumamente diferentes según las modalidades de aplicación del ozono al agua y el grado de contaminación de esta última.

En dosis reducida y con un tiempo de contacto breve, se beneficiará, no obstante, de una oxidación del tipo convencional, frecuentemente más enérgica y rápida que la obtenida mediante una simple inyección de aire o de oxígeno. Por ejemplo se observará que las sales ferrosas solubles se transforman en sales férricas insolubles, se observará una disminución del poder reductor del agua tratada, una oxidación de los sulfuros, de los hidróxidos fenólicos, etc. Estas oxidaciones se efectuarán generalmente en relaciones estequiométricas, en donde cada molécula de ozono proporciona un átomo de oxígeno activo y una molécula de este elemento.

Sin embargo, precisamente a causa de los reducidos coeficientes utilizados, estas oxidaciones de tipo convencional pueden ser incompletas. Además, el efecto esterilizante sin ser nulo puede ser exclusivamente parcial y el efecto sobre los sabores, olores y color puede ser incompleto.

Las ozonizaciones de este tipo han sido, históricamente, las primeras utilizadas para el tratamiento de aguas potables y han llegado a resultados excepcionales en ausencia de fuertes contaminantes o compuestos químicamente complejos.

Un ejemplo espectacular es el de la ozonización, desde hace unos setenta años, del agua del canal de la Vésubie, para el abastecimiento de la ciudad de Niza, que conduce un agua tratada de calidad perfecta con una constancia absoluta, tanto en lo que se refiere a los gérmenes prueba de contaminación fecal, como en lo referente al sabor y color.

Se puede encontrar la prueba contraria en los resultados de ozonización a coeficientes reducidos, del agua del Sena en la región parisiense y la de los cursos inferiores del Ródano, aguas cargadas de residuos urbanos e industriales.

En estos últimos ejemplos, se ha observado ya sea la presencia, de vez en cuando, de gérmenes fecales, o bien, el desarrollo de sabores que, por otra parte, son diferentes de los del agua cruda.

En estos casos, se ha producido un error en el modo de aplicación: Las aguas no requerían una oxidación del tipo convencional, sino una oxidación catalítica sumamente elevada. Estos dos tipos de oxidación requieren la creación de un exceso (residual) en el seno del agua tratada y el mantenimiento de este residual durante un tiempo suficientemente prolongado. La catálisis y la ozonólisis implican, en efecto, una sucesión de reacciones cuyo desarrollo no es instantáneo. El tiempo de contacto es necesario para el desarrollo de las reacciones sucesivas de los procesos de catálisis y de ozonólisis y el residual es necesario para garantizar la presencia efectiva del catalizador y para acelerar la destrucción de ciertos ozónidos.

Exclusivamente en estas condiciones de aplicación se puede hablar de una auténtica ozonización.

Esta auténtica ozonización constituye una técnica sumamente eficaz, que nunca ha presentado ninguna falla y que constituye, frecuentemente, el único medio de acción económicamente aceptable para la eliminación de ciertas contaminaciones o microcontaminaciones molestas e incluso peligrosas que vamos a ver brevemente a continuación.

El origen del color natural del agua puede ser debido a varios factores, entre los cuales se pueden citar las materias húmicas, combinadas o no con iones metálicos (entre los cuales se encuentran el hierro y el manganeso), las materias vegetales en descomposición, algas microscópicas. La eficacia de la ozonización para la eliminación del olor ha llamado la atención de los distribuidores de agua en todos los países y su eficacia ha sido certificada por bibliografía Inglesa, Alemana, Americana, Francesa, Rusa, etc. Los coeficientes de tratamiento indicados son relativamente elevados: 2g/m^3 y más, y los tiempos de contacto se escalonan entre 3 y 15 minutos. La velocidad de acción se encuentra en función de la temperatura, del pH y de la

presencia de cuerpos extraños cuya previa eliminación puede producir una -
disminución de los coeficientes de ozonización. En este punto es preciso
mencionar dos aspectos particulares, el de la presencia del hierro y del -
manganeso y el de las materias orgánicas reductoras.

Frecuentemente existe una relación entre la presencia de iones, hierro y -
manganeso y el color del agua. La eliminación del hierro y del manganeso
es tanto que tales no se justifica la utilización del ozono ya que frecuen-
tamente, es posible en efecto aplicar procedimientos de eliminación dife-
rentes. Sin embargo, estos elementos pueden ser complejos en el seno de -
grupos aniónicos y se deben destruir previamente. En este caso, el ozono
es un agente excepcional que precipita los elementos indeseables en forma
de hidratos insolubles de valencia elevada y ésto, para todos los pH que -
se encuentran normalmente en las aguas naturales.

Esta acción es especialmente interesante en el caso de manganeso. La -
transformación mediante el oxígeno del aire del manganeso en hidrato tetra-
valente $Mn(OH)_2$, insoluble, requiere un pH de 6.5.

La presencia de materias orgánicas reductoras tales como los polifenoles,
por ejemplo; dificulta la eliminación del color mediante los procedimien-
tos habituales. Una ozonización previa enérgica provoca una dislocación -
de estas materias orgánicas que lleva a una especie de floculación aparen-
te de las materias coloreadas, las cuales pueden ser entonces retenidas me-
diante un dispositivo mecánico de separación: filtro o microtamis. Un mé-
todo de tratamiento como éste es aplicado en varias estaciones de Francia,
especialmente en la región oeste.

Los sabores y olores constituyen un transtorno especialmente temido por -
los distribuidores de agua y al que son sumamente sensibles los utilizado-
res. Estos sabores pueden ser clasificados, según su origen, de la forma
siguiente:

- origen mineral:
hierro, manganeso, sulfuro de hidrógeno y mineralización total - elevada.
- origen orgánico natural:
ácido húmico, tanina, materia orgánica, aportadas por la es-
correntía y algas, y más frecuentemente masa planctónica.
- origen urbano:
productos de degradación de materias orgánicas de los desechos -
urbanos (glúcidos, prótidos y líquidos).
- origen industrial:
desechos químicos diversos, detergentes, hidrocarburos y alqui-
tranes.
- origen agrícolas:
pesticidas, hierbidas y fertilizantes minerales.
- origen propio del tratamiento:
principalmente productos clorados y fijados en las materias con-
taminantes que acaban de ser enumeradas.

En realidad, muy pocas veces se observan sabores u olores procedentes -
de una contaminación única, sino más bien se presentan combinaciones de -
contaminaciones. En los casos más complejos, se debe luchar contra esta -
contaminación de todo origen, ya sea simultáneamente o bien, sucesivamente
durante un año hidrológico.

La ozonización, ya sea final o distribuida en ozonización previa y ozoniza-
ción final, es en todos los casos un medio de eliminación de los olores -
tenaces "de tierra", de "enmohecido" o "farmacéuticos" sin que aparezcan sa-
bores originados por los clorofenoles, como ocurre con los derivados clora-
dos. Estos sabores que aparecen en las aguas precloradas desaparecen fre-
cuente después de efectuar la ozonización.

Por último, cabe hacer destacar que el agua ozonada se carga, a causa de -
la autodestrucción del residual, de una considerable cantidad de oxígeno -
disuelto que le confiere un sabor agradable, en opinión del consumidor.

La noción de microcontaminación ha sido establecida progresivamente durante los últimos años y abarca la contaminación por restos de productos orgánicos: hidrocarburos, sustancias extractibles mediante cloroformo (SEC), -detergentes aniónicos, fenoles diversos, pesticidas, etc.

El ozono actúa sobre estos microcontaminantes en dosis generalmente practicadas con el objeto de efectuar la esterilización. Aún no poseemos informaciones cuantitativas respecto a la eliminación de los pesticidas clorados y fosforados mediante ozonización, pero parece ser posible.

Por el contrario, numerosos estudios efectuados en U.S.A., URSS, Europa Occidental y Francia, han evidenciado la destrucción de otros microcontaminantes.

Los fenoles presentes en reducidas cantidades en las aguas crudas son radicalmente eliminados mediante una ozonización aplicada a un coeficiente bactericida o virulicida. Pero, también se ha establecido su acción en aguas mucho más cargadas. Un estudio detallado efectuado en aguas residuales y aguas de río muy cargadas (agua del Dnieper) con contenidos de 1 a 10 mg/L en compuestos hidroxilados (fenoles-naftoles-cresoles-pirocatequina, etc.) ha sido emprendido estos últimos años en U.R.S.S. Se evidenció la influencia del pH (de 2 a 14) y el tiempo de contacto (de 5 a 20 min). La presencia de cloro hace más sencilla la desodorización de las aguas pero disminuye el coeficiente de destrucción de cresoles y naftoles. Por último, el incremento del pH favorece la disminución de los coeficientes de fenol.

Un estudio americano relativo a aguas adicionadas de diferentes derivados fenolados y a aguas residuales de fábricas ha demostrado que las concentraciones de fenol de 5 mg/L desaparecían entre 10 y 15 minutos con el tratamiento del agua mediante ozono en dosis de 2.5 a 6 g/m³. En estas condiciones también son destruidos los cresoles con coeficientes de 0.2 a 0.4 mg/L. La destrucción obtenida mediante el ozono para los di y trifenoles al 0.2 mg/L (solución coloreada) y los naftoles a 0.5 mg/L se efectúa en 10 minutos.

Los detergentes

Son parcialmente oxidados por el ozono: con los productos de explotación corriente en Francia, se ha observado que los coeficientes de las aguas crudas varían de 50 a 300 μ g/L (expresados en lauril sulfato de sodio) - son reducidos en más de un 90% mediante un tratamiento que incluye una ozonización final de 2.5 a 4 g/m³ y se observa que la eficacia del tratamiento se debe fundamentalmente al ozono, ya que los contenidos correspondientes en las aguas decantadas y filtradas era de aproximadamente un 70% de los contenidos iniciales.

La demanda de ozono de los detergentes es del orden de 3 mg de ozono por - lmg de A.B.S., es decir un poco menos de 10 mg de ozono por radical funcional - SO₂ Na.

Sustancias extractibles mediante cloroformo.

(S.E.C.)

Los resultados de operación obtenidos a muy gran escala en una planta de - 100,000 m³/día que abastece el noreste de la aglomeración urbana parisienne han demostrado una eliminación excelente de estos productos: con un coeficiente inicial de 0.05 a 0.1 g/m³ (esta última cifra es comparable con los resultados obtenidos con ciertas aguas minerales de referencia).

Hidrocarburos

Estos productos son incluidos en parte en el extracto cloroformico. Recientemente, los soviéticos han efectuado trabajos sobre la ozonización, - en laboratorio, de emulsiones de petróleo crudo (de 6.5 a 200 mg/L aproximadamente) y de productos petrolíferos (de 3 a 6 mg/L). Si bien la destrucción del petróleo crudo, en 10 minutos, es imperfecta (persiste un olor de Keroseno) se obtiene en el mismo tiempo, la total desodorización - de la mezcla keroseno-gasolina. La demanda (experimental) de ozono es de 1.5 a 1.7 g/O₃ por gramo de producto.

Acción Esterilizante del Ozono.-

Acción Bactericida.

Este es el objetivo inicial de la ozonización en la industria del agua. Las primeras pruebas de esterilización satisfactorias fueron realizadas para el abastecimiento de la región parisiense, desde finales del siglo XIX. De este modo, la amplitud del poder bactericida del ozono es sumamente antiguo y sus resultados son actualmente clásicos. Un estudio más reciente de los mecanismos de ozonización de las bacterias ha demostrado que el ozono actuaba de forma rápida sobre éstas bajo reserva del mantenimiento de un residual - después de un tiempo de contacto definido. Probablemente ésto se debe a una ozonización de la masa de las proteínas bacterianas por un proceso de oxidación catalítica.

Los ensayos efectuados en gérmenes-prueba convencionales (E. Coli, Clostridium Perfringens) precisan coeficientes (con una letalidad del 99%) residuales de 0.2 a 0.5 g/m³ en suspensiones bacterianas en laboratorio. El ozono es muy activo sobre las esporas y quistes. Por último, en los casos accidentales de gran contaminación bacteriana, la aplicación de elevadas dosis de ozono no creará ningún problema de sabores y olores.

Acción Virulicida.

El ozono también actúa neta, rápida y radicalmente sobre numerosos virus. Parece ser que el modo de acción sea, al igual que en el caso de las bacterias, una oxidación global de la materia viral.

Recientemente, tanto en Francia, como en otros países, se han realizado pruebas de determinación del poder de inactivación del ozono respecto a diferentes virus (responsables, especialmente, de la poliometitis y otros enterovirus).

El Instituto Pasteur y el laboratorio de Higiene de la ciudad de París, han demostrado que existe un límite de contenido residual de ozono (0.3 g/m³) - por encima del cual la inactivación es total. Si este coeficiente es mantenido como mínimo durante 4 minutos, el coeficiente de inactivación es superior al 99.99% de los virus presentes al comienzo, ya sea con agua de río -

filtrada o agua destilada. (figuras 3.1 y 3.2)

En este caso encontramos el mecanismo de acción catalítica descrito anteriormente.

Acción sobre el plancton.

La aplicación de la ozonización en coeficientes de 0.5 a 1 g/m³, destruye también algas y los protozoarios. Los moluscos adultos de pequeña dimensión son relativamente resistentes (80% de mortalidad en 30 minutos en - 2.2 g/m³) ya que sus larvas son destruidas en un 98% en tiempos más breves. La mortalidad de los demás elementos del plancton (exceptuando los quironómidos, también cloro-resistentes) es elevada. Por último, la ozonización destruye también los productos odorígenos o saporígenos procedentes del metabolismo de los componentes del plancton.

Interés de la ozonización previa.

Se ha demostrado en experiencias realizadas a nivel semi-industrial que la ozonización previa, si bien es aplicada según un método bien adaptado a la calidad del agua tratada, no debe conducir a que se consuman cantidades de ozono muy superiores a las requeridas por una ozonización posterior única, bajo reserva de que se proceda a una reutilización del aire - del ozono residual de la postozonización. Esta preozonización hace que la dirección de los tratamientos de esterilización bacteriana y viral, de decoloración y desodorización sea más sencilla y segura. La preozonización tiene la ventaja de disminuir sensiblemente las contaminaciones de los depósitos de tratamiento (decantadores, filtros) y, en realidad, favorece (en el caso de coagulación mediante reactivos de varias valencias) la insolubilización completa de los residuos de hidrólisis.

Aún no se ha efectuado un balance económico comparativo con la precloración y la preperoxi-cloración. En un primer análisis, parece ser que para coeficientes reducidos de preozonización, el pretratamiento mediante peróxidos de cloro debe ser más costoso y esto debido a efectos globales menos satisfactorios.

Pero el interés principal de esta ozonización previa reside en el hecho que los utilizadores, estadísticamente hablando, prefieren la calidad del agua que ha experimentado una pre y postozonización, a la del agua simple

filtrada o agua destilada. (figuras 3.1 y 3.2)

En este caso encontramos el mecanismo de acción catalítica descrito anteriormente.

Acción sobre el plancton.

La aplicación de la ozonización en coeficientes de 0.5 a 1 g/m³, destruye también algas y los protozoarios. Los moluscos adultos de pequeña dimensión son relativamente resistentes (80% de mortalidad en 30 minutos en - 2.2 g/m³) ya que sus larvas son destruidas en un 98% en tiempos más breves. La mortalidad de los demás elementos del plancton (exceptuando los quironómidos, también cloro-resistentes) es elevada. Por último, la ozonización destruye también los productos odorígenos o saporígenos procedentes del metabolismo de los componentes del plancton.

Interés de la ozonización previa.

Se ha demostrado en experiencias realizadas a nivel semi-industrial que la ozonización previa, si bien es aplicada según un método bien adaptado a la calidad del agua tratada, no debe conducir a que se consuman cantidades de ozono muy superiores a las requeridas por una ozonización posterior única, bajo reserva de que se proceda a una reutilización del aire - del ozono residual de la postozonización. Esta preozonización hace que la dirección de los tratamientos de esterilización bacteriana y viral, de decoloración y desodorización sea más sencilla y segura. La preozonización tiene la ventaja de disminuir sensiblemente las contaminaciones de los depósitos de tratamiento (decantadores, filtros) y, en realidad, favorece (en el caso de coagulación mediante reactivos de varias valencias) - la insolubilización completa de los residuos de hidrólisis.

Aún no se ha efectuado un balance económico comparativo con la precloración y la preperoxi-cloración. En un primer análisis, parece ser que para coeficientes reducidos de preozonización, el pretratamiento mediante peróxidos de cloro debe ser más costoso y esto debido a efectos globales menos satisfactorios.

Pero el interés principal de esta ozonización previa reside en el hecho - que los utilizadores, estadísticamente hablando, prefieren la calidad del agua que ha experimentado una pre y postozonización, a la del agua simple.

TITULO DE LA SUSPENSION VIRAL

PRUEBAS DINAMICAS EN AGUA DESTILADA
Fig. 3.1

Nº DE UNIDADES INFECTANTES U_i (D. 80%) POR CM³

10 000 (10⁴)

1 000 (10³)

100 (10²)

10 (10¹)

100 U_i

4

3

2

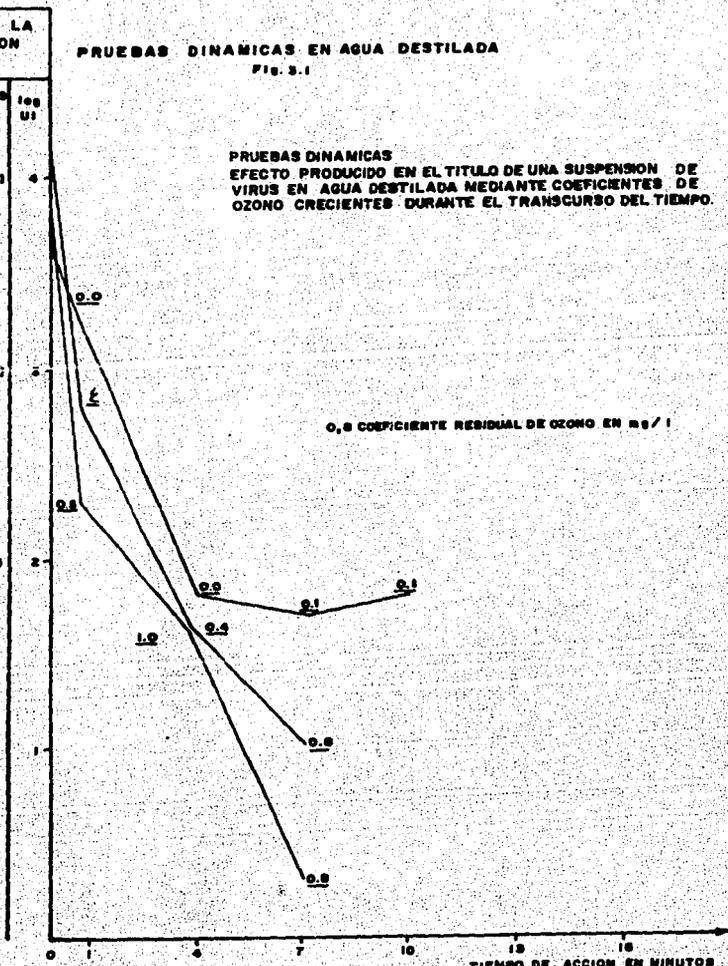
1

PRUEBAS DINAMICAS EFECTO PRODUCIDO EN EL TITULO DE UNA SUSPENSION DE VIRUS EN AGUA DESTILADA MEDIANTE COEFICIENTES DE OZONO CRECIENTES DURANTE EL TRANCURSO DEL TIEMPO.

O₃ COEFICIENTE RESIDUAL DE OZONO EN mg/l

0 1 4 7 10 13 16

TIEMPO DE ACCION EN MINUTOS



TITULO DE LA SUSPENSION VIRAL

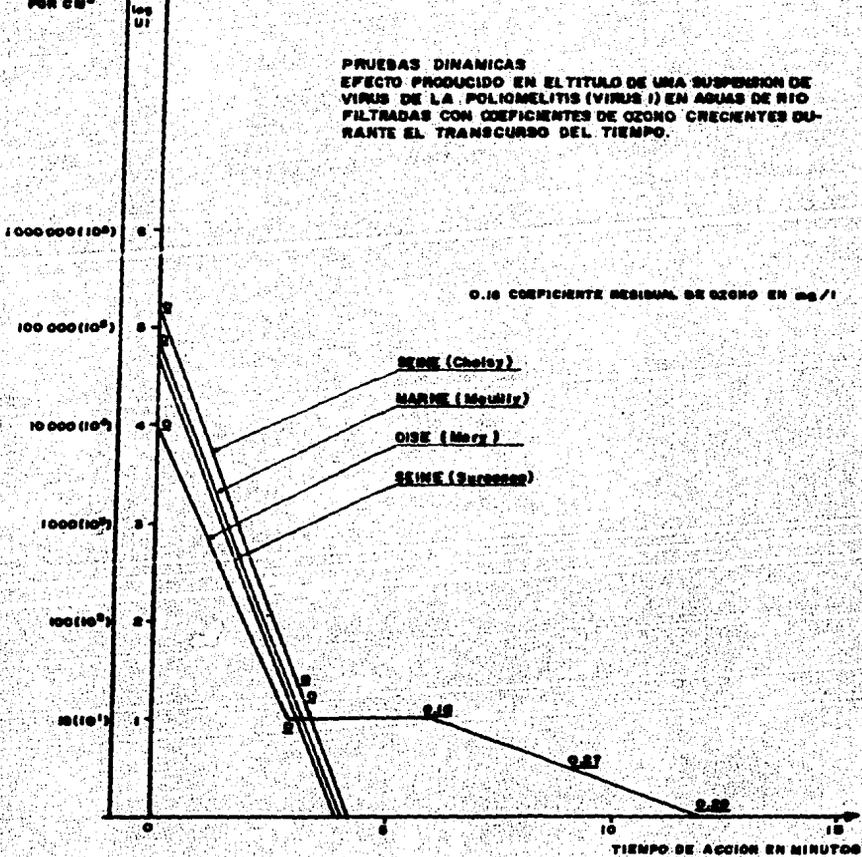
PRUEBAS DINAMICAS EN AGUAS DE RIO FILTRADAS

Fig. 3.2

NUMERO DE UNIDADES INFECTANTES UI (D₅₀ %) POR CM³

log UI

PRUEBAS DINAMICAS EFECTO PRODUCIDO EN EL TITULO DE UNA SUSPENSION DE VIRUS DE LA POLIOMELITIS (VIRUS I) EN AGUAS DE RIO FILTRADAS CON COEFICIENTES DE OZONO CRECIENTES DURANTE EL TRANSCURSO DEL TIEMPO.



mente postozonizada con el mismo coeficiente global.

Producción y transferencia del ozono.

Producción del ozono.

En la práctica del tratamiento de aguas, el ozono es exclusivamente utilizado, en realidad, en forma de aire enriquecido de ozono. El aire ozonado es obtenido por emanación de una corriente de aire perfectamente seca, mediante una corriente alterna de baja frecuencia y a alta tensión, en el interior de un condensador (coaxial o plano).

Los diferentes tipos de ozonizadores utilizados son: ya sean modelos de placas, o bien modelos tubulares. Estos ozonizadores poseen dos electrodos concéntricos. Se puede utilizar ya sea un electrodo central de alta tensión de acero inoxidable y un electrodo de masa constituido por la camisa de agua de refrigeración, o bien un electrodo central obtenido por metalización de un "dedo de guante" de cristal pirex y un electrodo de masa constituido por un tubo de acero inoxidable enfriado mediante circulación de agua. En todos los casos, el dieléctrico es una hoja o un tubo de cristal colocado entre los electrodos. Entre los electrodos y los dieléctricos se acondiciona un espacio anular de algunos milímetros destinado a la circulación de aire en tratamiento. Un ozonizador industrial tubular está constituido, en la práctica, de un haz de algunos centenares de estos tubos elementales cerrados en un recinto hermético, virtualmente cilíndrico, de acero inoxidable.

El fluido de alimentación es el aire a una ligera sobrepresión de 0.5 a 1 atmósfera. Es preciso obtener un secado muy profundo del aire admitido en el ozonizador (punto de rocío, del orden de -30°C a -60°C) con objeto de mejorar el rendimiento energético y la resistencia de los dieléctricos y electrodos. La ozonización de aire húmedo lleva, en efecto, a la formación de óxidos de nitrógeno y, en consecuencia, de restos de ácido nítrico.

El secado profundo del aire de alimentación puede ser efectuado por el enfriamiento del aire mediante la utilización de absorbentes porosos de gran superficie específica (geles de silicio o alúmina activados) o mediante estos dos procedimientos en serie en la corriente gaseosa. Esta desecación en dos fases es la regla para las grandes unidades de producción continua y permite recoger, en una primera fase, una importante fracción del agua en forma condensada sin fenómeno de congelación y hacer trabajar la unidad de secado mediante absorbentes en condiciones uniformes de carga. Todo ello favorece la programación y regulación de las operaciones de regeneración del absorbente y permite que los absorbedores funcionen con el mejor rendimiento posible.

Las tensiones de emanación son limitadas por la aparición de arcos (o chispas) de unos veinte kilovoltios en los ozonizadores industriales. Las grandes unidades son generalmente alimentadas de forma directa con corriente industrial de 50 Hz mediante un transformador elevador cuya tensión primaria puede ser ajustada por un regulador de inducción. Pese a que el rendimiento de la ozonización aumenta con la frecuencia de la corriente, con un máximo poco marcado hacia 500 Hz, el costo de instalación y mantenimiento de un dispositivo convertidor de frecuencia (estático o dinámico) tiende a reservar la utilización de frecuencias superiores a 50 Hz, para las pequeñas instalaciones.

La producción de ozono aumenta regularmente con la tensión aplicada (pero aparece un límite cuando el chisporroteo es demasiado importante). Esta producción aumenta también con el flujo de aire seco, pero cada vez más lentamente por los flujos elevados. Por último si se añade cierta cantidad de oxígeno (del 0 al 20%) al aire seco, el incremento del rendimiento de ozono es ligeramente superior al incremento del % de oxígeno, por lo menos en tensiones elevadas: de este modo, un enriquecimiento del 10% se manifiesta mediante un incremento del 11 al 12% de la producción, a la tensión máxima admisible. No obstante, el precio de costo del oxígeno gaseoso es, en este caso, el factor determinante del interés práctico de esta solución.

Un estudio sistemático de la ozonización, efectuado recientemente por investigadores rusos tiende a probar que el rendimiento máximo a una presión cercana a la atmósfera (expresada en grado de conversión del oxígeno de ozono) se alcanza para mezclas de oxígeno nitrógeno con un 68% de nitrógeno (lo cual corresponde a un enriquecimiento cercano al 16%) y disminuye rápidamente en las mezclas del 75 al 81% de nitrógeno, probablemente a causa de la acción inhibitoria de los óxidos de nitrógeno.

El rendimiento energético depende de la concentración del aire ozono. Esta concentración varía, en la práctica de algunos gramos a 25 g/m³ y el rendimiento energético óptimo corresponde a 14 g/m³ aproximadamente de ozono, es decir, cerca de un 1% del peso varía poco entre 10 y 20 g/m³. Su valor es del orden de 21 kWh/kgO₃, del cual, el 15% aproximadamente (en las condiciones medias de funcionamiento) es consumido para alimentar los servicios dependientes (sobrepresor, acondicionado del aire y circulación del agua de refrigeración). En la figura 3.3 está representado el esquema de conjunto de una instalación de producción y aplicación del ozono.

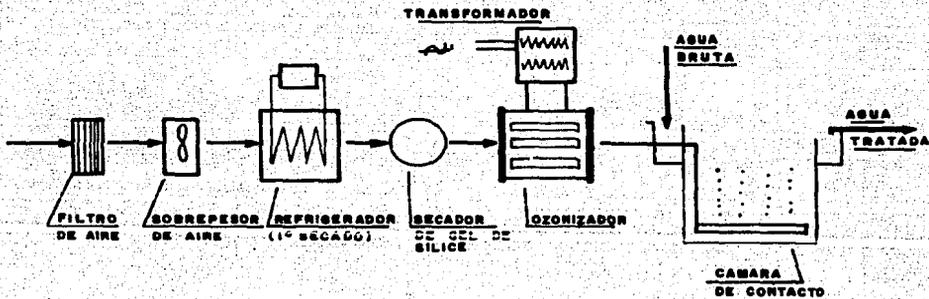
El consumo de energía de producción W (Wh/g) es determinado en función de la concentración C (g/m³) mediante la fórmula:

$$W = \frac{C + 35}{3} + \frac{65}{C}$$

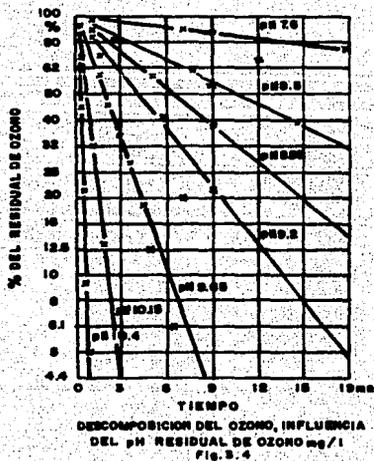
que corresponde a una concentración óptima de: C_{min} = 14 g/m³. Pero, es interesante observar con más detalle los valores numéricos:

C	1	2	5	10	14	15	20	25	30
W	77	49	26	21.5	20.6	20.9	21.6	22.6	23.9

Entre 10 y 20 g/m³, la variación es muy pequeña y las elevadas concentraciones útiles para la desgreación de ozónidos ya no son costosas.



ESQUEMA DE UNA INSTALACION DE PRODUCCION Y APLICACION DE OZONO
Fig. 3.3



Estabilidad del Ozono.-

El aire ozonado seco se descompone lentamente a la temperatura ambiente. Su descomposición es mucho más rápida a elevadas temperaturas o en presencia de humedad, o materias oxidables y es catalizada entre otros compuestos por N_2O_5 .

En solución acuosa, la velocidad de autodestrucción del ozono depende del pH del género y concentración de las sales disueltas y es muy favorecida por la presencia de iones OH^- . En la figura 3.4, están representadas las curvas de descomposición de ozono en función del tiempo, que demuestran la influencia considerable del pH. y en la figura 3.5 está representada una curva de descomposición del ozono en un agua natural.

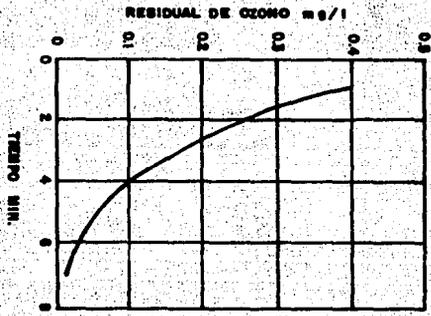
Se han realizado numerosos estudios sobre la descomposición del ozono en solución acuosa más o menos salina. Se ha afirmado que la descomposición se efectuaba según leyes de segundo orden o de $3/2$ de orden, pero en la práctica, se ha demostrado que una ley del tipo:

$$\text{Log } \frac{R_0}{R} = a (T - T_0)$$

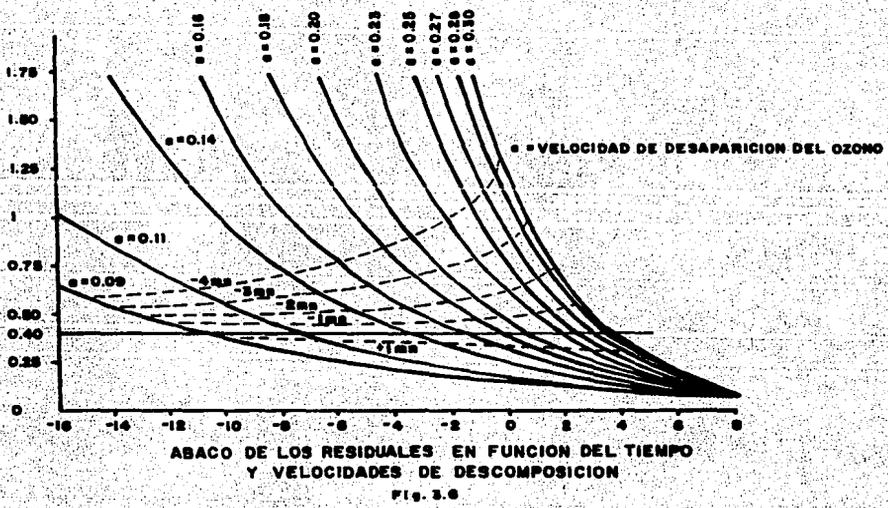
donde R_0 y R son los residuales de ozono que pueden ser encontrados en el agua en los tiempos T_0 y T y siendo a el coeficiente de descomposición, es suficientemente precisa para permitir efectuar previsiones.

En la figura 3.6 se encuentra un ábaco que se aplica correctamente a aguas de la región parisiense, para el estudio y la previsión del comportamiento de un agua ozonada, para diferentes valores del coeficiente de desaparición.

Para el examen de este ábaco, se puede observar, que a partir del momento en que el coeficiente de desaparición del ozono es superior a los valores mínimos figurados, el residual varía muy repentinamente. También puede observarse que la introducción masiva del ozono en una única vez en el agua que debe ser tratada no es, a ciencia cierta, el método que hace que el rendimiento de utilización sea el mayor.



DISMINUCION DEL RESIDUAL EN UN AGUA NATURAL
 FIG. 3.5



En un caso como éste, la cantidad de ozono autodestruida y, en consecuencia no utilizada, será muy superior al que resultaría de una operación de introducciones sucesivas durante toda la duración de la operación prevista en la que es preciso mantener un residual mínimo durante todo el transcurso.

Para obtener todos los efectos pretendidos, la ozonización debe ser realizada en dos fases sucesivas:

- En primer lugar, saturar la demanda inmediata oxidando el agua tratada y acto seguido, crear y mantener la presencia de un exceso de ozono, es decir, de un residual de ozono. Ya se ha visto anteriormente, a propósito del poder virulicida y del mecanismo de la ozonólisis, el motivo de estas dos fases.

Si bien la autodestrucción desempeña únicamente una función secundaria durante la primera fase, durante la segunda, se opone naturalmente al mantenimiento del exceso de ozono.

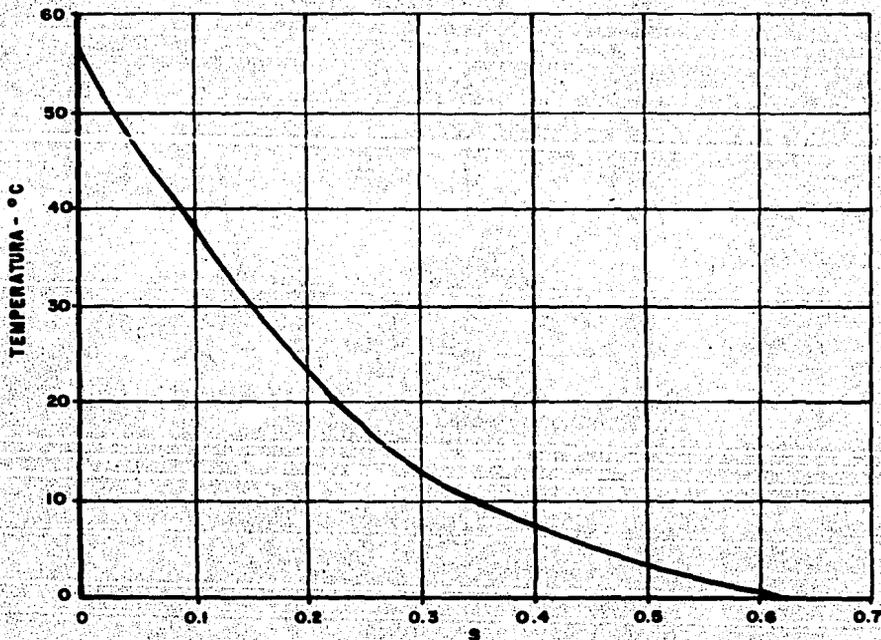
Modos de aplicación del ozono.-

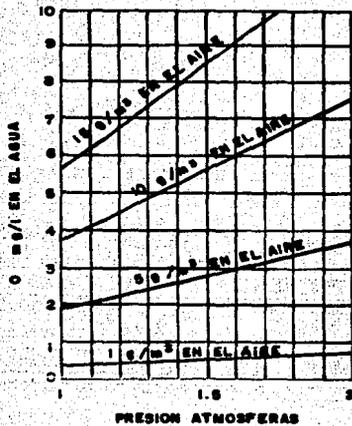
Consideraciones teóricas.

Las disoluciones de ozono siguen la ley de Henry, ya que las cantidades disueltas se encuentran en función de la temperatura y presión, determinadas con el de la concentración del ozono en el aire en contacto, en el equilibrio. En la figura 3.7 se indican las variaciones de este coeficiente de distribución en función de la temperatura a una presión total equivalente a una atmósfera y en la figura 3.8 se encuentra una gráfica que indica las variaciones de solubilidad en el agua a temperatura constante (10°C), pero con coeficientes crecientes de ozono en el aire ozonado y para presiones crecientes de aire ozonado.

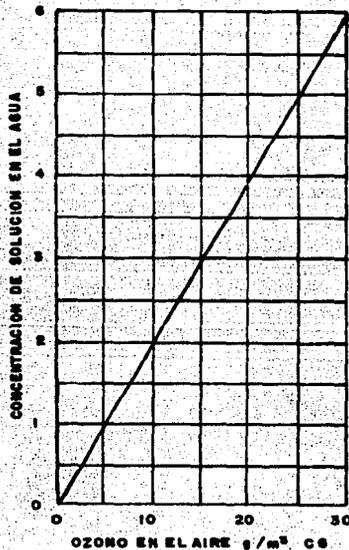
EFFECTOS DE LA TEMPERATURA EN EL COEFICIENTE DE
DISTRIBUCION $\frac{C_{agua}}{C_{aire}}$

Fig. 3.7





EFFECTO DE LA PRESION EN LA SOLUBILIDAD
DEL OZONO A 10°C
Fig. 3.8



EFFECTO DE LA CONCENTRACION DEL AIRE OZONADO
EN LA SOLUBILIDAD EN EL AGUA A 22°C
Fig. 3.9

En la anterior figura 3.9 se muestran las variaciones de solubilidad de equilibrio del ozono en función de los coeficientes de ozono en el aire en contacto para una temperatura de 22°C y una presión de una atmósfera.

El tratamiento de ozonización consistirá en introducir aire ozonado en el agua y efectuar la transferencia del ozono de la fase gaseosa hacia la líquida.

La Transferencia de masa del ozono se efectúa mediante difusión a través de la interfase aire-líquido.

Si la fase gaseosa tiene movimientos en su seno, la difusividad en fase gaseosa es siempre muy superior a la difusividad en fase líquida. En estas condiciones, la velocidad de transferencia es dirigida principalmente por los procesos de transferencia en el seno de la película líquida y también en el seno del cuerpo del líquido mismo, si este último no circula de forma turbulenta. El valor superior de la concentración en la película líquida cerca de la interfase es el de la saturación, que depende del coeficiente de distribución y de la concentración de ozono en la fase gaseosa.

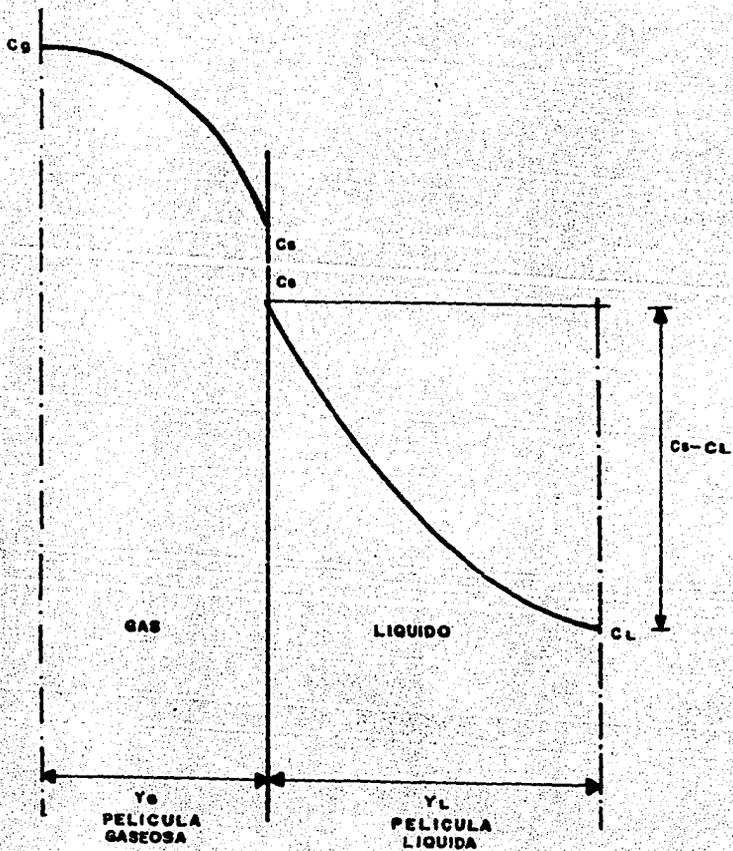
Se puede demostrar que la velocidad de transferencia de masa puede ser representada mediante la ecuación de la forma siguiente (figura 3.10)

$$\frac{dm}{dt} = \frac{D}{Y_f} A (C_s - C_r)$$

siendo:

- D: Coeficiente de difusividad
- A: Área de interfase
- Y_f : Espesor de la película
- C_s : Concentración de saturación (en líquido)
- C_g : Concentración en la película gaseosa.
- C_r : Concentración en la masa líquida

ESQUEMA DE TRANSFERENCIA DE MASA A TRAVES DE
DOS PELICULAS
Fig. 3.10



Dado que: $\frac{C_g}{C_g} = S$ Coeficiente de distribución, se puede escribir, teniendo en cuenta la presión a la que será aplicado el aire ozonado y siendo P esta presión y P_a la presión atmosférica: $C_g = S C_g \frac{P}{P_a}$

Las condiciones favorables para obtener una velocidad de transferencia elevada serán, por consiguiente:

- Una concentración elevada de aire ozonado C_g
- Una presión de aplicación elevada P
- S elevado

Para que el intercambio se produzca en el sentido gas hacia líquido, podemos observar que C_g debe ser superior a C_r. Razonando de forma inversa, se observa que la concentración de ozono del aire ozonado debe ser siempre superior a la que se obtendría a partir del residual de ozono en el agua mediante la aplicación de la forma del coeficiente de distribución.

De este modo, vemos aparecer la noción de presión motriz: En un tiempo limitado, es imposible eliminar todo el ozono de una burbuja de aire ozonado, incluso si el agua en contacto está desprovista de residual. Una pérdida de ozono es, en consecuencia, inevitable. El aire ozonado "agotado" procedente de las cubas de ozonización poseerá aún, en consecuencia, un contenido de ozono. Este coeficiente residual es independiente del flujo pero depende de las características del agua en los últimos instantes del contacto burbujas-agua. Esta pérdida será pues, tanto más reducida en valor absoluto, como en valor relativo cuanto más elevada sea la concentración inicial del ozono del aire ozonado. Para un tratamiento determinado, la cantidad perdida inútilmente a la salida de las cubas es, de este modo, proporcional a la cantidad de aire aplicada, es decir, inversamente proporcional a la concentración inicial del aire ozonado utilizado.

Si al finalizar la ozonización, el agua contiene un residual C_r, la concentración de aire ozonado al contacto no puede ser inferior a:

$$C_{gf} = 2.5 Cr + p$$

como el rendimiento es de la forma:

$$r = 1 - \frac{C_{gf}}{C_g}$$

se puede calcular de este modo la energía consumida por grama de ozono útil y determinar la concentración óptima la cual, una vez efectuados todos los cálculos se sitúa cerca de 20 g/m³.

La fórmula $C_{gf} = 2.5 Cr - p$ nos indica que se debe mantener el residual Cr - en su valor más reducido posible, es decir, exactamente en el valor que se rerá requerido para las impurezas que deberán ser eliminadas (0.4 g/m³ para obtener un efecto virulicida, por ejemplo).

En otras palabras, todos los métodos que llevan a la creación de un residual excesivamente del tratamiento mismo, producirán una pérdida inútil de ozono a la salida de las cubas, lo cual se añadiría al hecho de que este residual excesivamente abundante desacelerará los intercambios provocando un tiempo mayor de aplicación, al igual que una pérdida mayor por autodestrucción del ozono.

Para efectuar la transferencia de materia de la fase gaseosa a la líquida, se puede, ya sea dispersar el gas en el líquido, o dispersar el líquido en la atmósfera gaseosa o bien, efectuar un contacto de una corriente de gas a lo largo de una capa de líquido colocada en forma de una película delgada.

Estos diferentes métodos han sido utilizados en el pasado. Los coeficientes de aplicación del ozono en el agua eran entonces del orden del gramo - de ozono por m³ ya que el ozono en el aire ozonado no sobrepasa, o muy pocas veces, concentraciones del orden de 10 g/m³. Esto quiere decir que - las cantidades de aire ozonado que deberán ser aplicadas al agua eran del orden de 100 litros de aire ozonado por m³ de agua tratada.

En la actualidad, por motivos diversos, y debido al mayor conocimiento de los fenómenos que dirigen la acción del ozono en el agua, y sobre todo al hecho de que un efecto virulicida es obtenido exclusivamente con residuales considerables mantenidos durante un tiempo suficiente, los coeficientes de tratamiento han pasado a ser de 2 y 4 g/m³.

Como en la actualidad se puede producir aire ozonado de 20 g/m³, los coeficientes de aplicación, pese haber aumentado, permanecen dentro de la gama de 100 a 200 litros de aire ozonado/m³ de agua tratada. Las cantidades de aire ozonado son, en consecuencia, reducidas respecto al volumen de agua en cuestión. Por lo tanto, en la práctica, energéticamente es más ventajoso dispersar el aire ozonado en el agua, en lugar de pulverizar la masa líquida en un recinto que contiene aire ozonado en movimiento.

Aparatos de Disolución.-

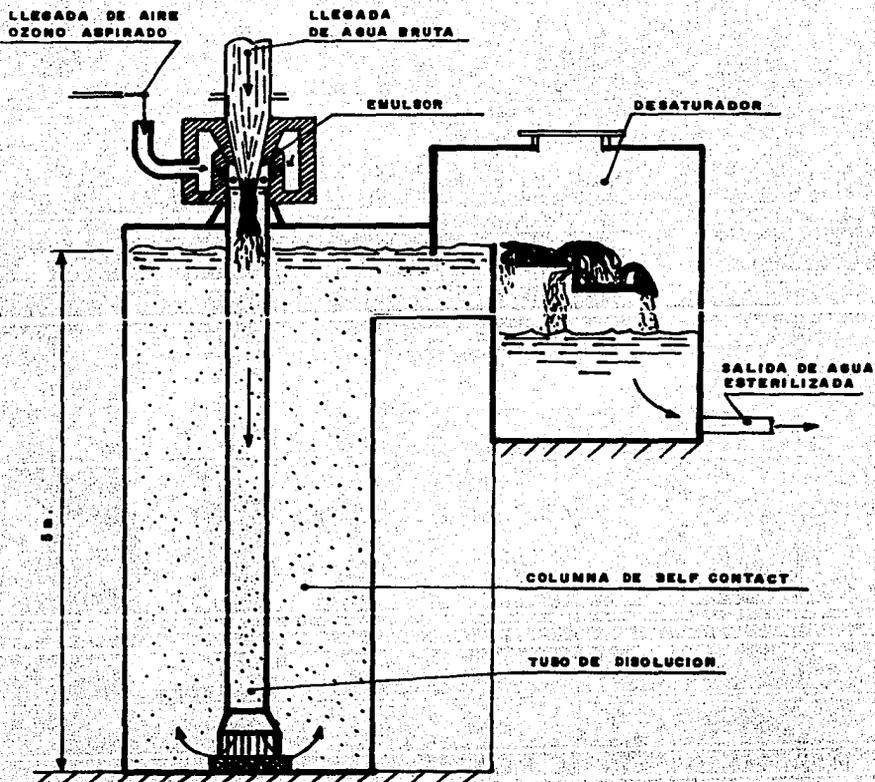
Durante mucho tiempo se han utilizado y se utilizan aún emulsores cuyo esquema aparece en la figura 3.11. Todo el caudal de agua pasa por un gran hidroyector de materia inatacable por el ozono, como por ejemplo arena y aspira el aire ozonado en los ozonizadores. Las características de los hidroyectores en servicio son las siguientes:

- carga de agua en el hidroyector: de 5 a 6 m. de agua,
- altura de agua en la cuba: 5 m.
- tiempo de contacto en la cuba: 5 minutos aproximadamente.

En este dispositivo se obtiene una puesta en contacto repentina del aire ozonado con el conjunto del agua que debe ser tratada y acto seguido; se conserva un contacto con burbujas gaseosas que se agotan en la capacidad de reacción denominada columna de self contact, en corrientes paralelas.

Con objeto de evitar el inconveniente de almacenar todo el caudal que debe ser tratado en emulsores, ciertos servicios de agua han adoptado el principio de ozonización directa; que consiste en disolver la totalidad -

SECCION ESQUEMATICA DEL DISPOSITIVO DE OZONIZACION
MEDIANTE EYECTOR
FIG. 3.11

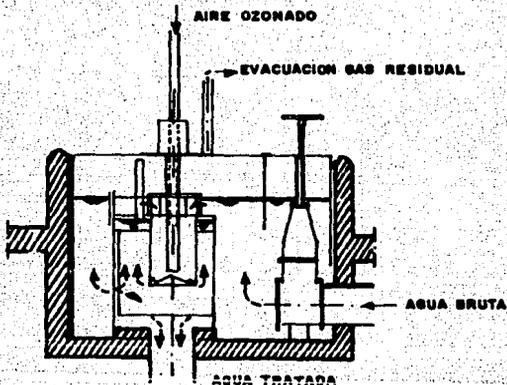


del ozono disponible en una fracción del agua que debe ser tratada y, enseguida, mezclar esta agua superozoneada con el resto. Este método simplifica, evidentemente, los aparatos de contacto si se quieren tratar cantidades muy grandes de agua. Sin embargo, al parecer, este método ignora la disminución de rendimiento procedente del hecho que se prepara en una primera etapa una masa de agua con un residual muy elevado, mucho más elevado que el que es necesario, etapa durante la cual la velocidad de auto-destrucción es virtualmente mayor que en el seno de una masa de agua tratada con el residual mínimo. Por otra parte, este método presenta una sujeción suplementaria, la de la mezcla íntima y rápida de la totalidad del agua tratada con la fracción del caudal sobreozoneado.

Otro método de emulsión es el de los emulsionadores mecánicos rotativos, cuyo elemento principal es un cilindro vertical perforado que gira en el agua a 2,200 r.p.m. El movimiento de rotación rápido crea una aspiración del aire ozoneado que se escapa gradualmente por las perforaciones y se emulsiona con el agua procedente del rotor (figura 3.12).

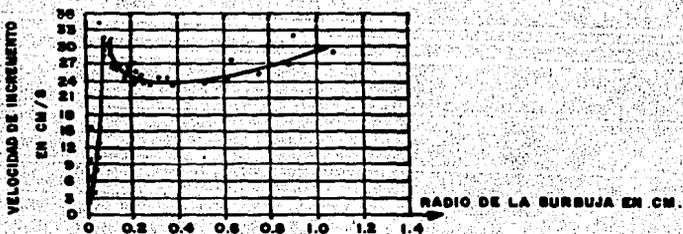
Este sistema de emulsión mecánica presenta, respecto al sistema de inyección, la ventaja de no precisar caída de agua. Por el contrario, la demanda de energía mecánica es del orden de 13 Kwh/Kg de ozono introducido en el agua, para un contenido de aire ozoneado de 10 g. para el mezclador considerado, que existe y que está en funcionamiento, las pérdidas de ozono en la superficie del agua que rodea la turbina son del orden del 27%. Sin duda se podría efectuar una mayor absorción del ozono dispersando más aún las burbujas de aire, pero esto podría ser obtenido exclusivamente incrementando el gasto de energía. En este caso, observamos que al igual que en el caso de la emulsión por eyección, el aire ozoneado es introducido en el agua a la presión atmosférica o incluso a una presión ligeramente inferior.

Tanto en Alemania como en la U.R.S.S., se ha utilizado el procedimiento de disolución por chorro de agua en el interior de una cámara en la que circula el aire ozoneado; en este caso nos encontramos en presencia de una ampliación al ozono de una técnica ya empleada para la aereación del agua. Para que la pulverización sea eficaz, es decir, para que las gotas de -



EMULSOR ROTATIVO MECANICO

Fig. 3.12



VELOCIDAD DE ASCENSION DE LAS BURBUJAS DE AIRE EN FUNCION DE SU DIMENSION

Fig. 3.13

agua que caen en la cámara de aire ozonado sean sumamente finas, es preciso que la presión en las toberas de dispersión sea elevada. La pérdida de carga eficaz es del orden de unos 10 mts. como mínimo. Además, para que las gotas formadas no se transformen demasiado rápido en una superficie de agua que chorree por las paredes, es preciso que el techo y los muros de las cámaras de contacto se encuentren relativamente alejados de las toberas de pulverización. Esta técnica es, en consecuencia, relativamente onerosa en energía y espacio pero, aunque no se a generalizado, no hay que rechazarla a priori. Su adopción requiere un exámen profundo de las condiciones de intercambio realizadas entre las gotas de agua y el aire ozonado.

También existen algunas instalaciones en donde el contacto agua-aire ozonado es realizado en columnas de guarnición que al igual que los emulsores, o como los pulverizadores de agua en cámara, producen una ruptura de carga entre las aguas crudas y las aguas tratadas que puede ser superior a 6 metros.

La torre de absorción está constituida por una cubierta guarnecida en cierta altura mediante un apilamiento de anillos Rashig, planchas de Berl, etc. en donde circulan 2 corrientes.

- Una corriente gaseosa desde abajo hacia arriba,
- una contracorriente líquida encargada de lavar la corriente gaseosa en el caso preciso que nos interese extraer el ozono del aire ozonado.

La función del llenado consiste en formar recorridos y presentar una amplia superficie humectante en la que se efectúan los intercambios entre las dos fases. En el caso de la ozonización de aguas, estas columnas de guarnición constituyen dispositivos superabundantes y demasiado costosos ya que los flujos de la fase gaseosa son reducidos comparados con los de la fase líquida. Sin evidentemente pretender condenar los demás procedimientos que, perfeccionados podrían ser de nuevo competitivos, se puede afirmar que el procedimiento mejor adoptado en la actualidad es el procedi

miento por difusión de burbujas gaseosas en las cámaras de contacto, bajo reserva, evidentemente, de que este procedimiento sea aplicado respetando las reglas precisas.

El procedimiento de difusión por porosidad presenta ventajas energéticas - respecto a los demás modos de emulsión o de dispersión y favorece el incremento de la concentración de ozono en el aire ozonado, debido a la compresión en el momento en que este aire ozonado es forzado a través de los poros de los difusores.

En la figura 3.13 se encuentra una representación gráfica de la velocidad ascensional en función de la dimensión de las burbujas. Se observa que la velocidad, regularmente creciente al comienzo, pasa por un máximo a medida que el diámetro de las burbujas aumenta, para posteriormente disminuir y - pasar por un mínimo para un radio de la burbuja equivalente a 3 mm. aproximadamente y a continuación, crecer pero de forma mucho menos marcada.

Además las leyes de formación de burbujas a partir de un elemento poroso sumergido, que han sido objeto de numerosos estudios, no son simples. La dimensión de las burbujas producidas es determinada por el diámetro del poro capilar y ciertos autores han indicado una relación entre el diámetro - de la burbuja formada, el del poro, la tensión superficial en la interfase gas/líquido y las densidades del líquido y del gas. Estas fórmulas son verificadas en regímenes burbuja a burbuja y en el caso en que la burbuja - formada sea esférica. Teniendo en cuenta el flujo de gas, se produce una frecuencia de separación de las burbujas.

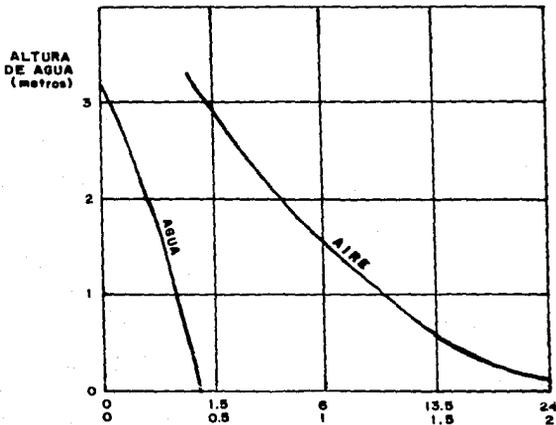
El incremento del flujo, mientras que se continúe en régimen burbuja a burbuja, produce un incremento de esta frecuencia de separación pero acto seguido incrementa la dimensión de la burbuja. A partir de cierto flujo, - las frecuencias de separación se estabilizan y las burbujas continúan a aumentar de volumen hasta que se alcanza un número de Reynolds del orden de 2000.

De este modo observamos que el número de parámetros que dirigen las condiciones globales de intercambio en una cámara de difusión es considerable. Si se altera uno de estos parámetros las condiciones cambian. Ahora bien, las condiciones de tratamiento no son fijas, los caudales pueden variar y la calidad del agua se modifica durante el transcurso del año ya que el coeficiente de autodestrucción depende del pH, de la temperatura y del género de impurezas presentes y el coeficiente de distribución depende de la temperatura.

Una de las cualidades del método de ozonización por porosidad en cámaras sucesivas es precisamente su flexibilidad. Este método puede ser adaptado a las variaciones de las condiciones exteriores impuestas haciendo variar el número de cámaras en servicio, la distribución de los flujos del aire ozonado entre las diferentes cámaras y, por último, el número de poros en servicio en cada cámara. Haciendo variar estas posibilidades, en primer lugar se satura la demanda de ozono del agua y al final de esta primera fase se crea un residual de 0.4 g/m^3 . Es lo que se puede denominar la condición de oxidación. Esta etapa se realiza en una primera cámara de contracorrientes. A continuación, se mantiene este residual durante un tiempo determinado que es como mínimo equivalente a 4 minutos en el caso en que se desee obtener un efecto virulicida completo. Esta segunda fase continúa en las cámaras sucesivas en las que el ozono es aplicado, ya sea en corrientes paralelas o bien en contracorrientes. En las figuras 3.14 y 3.15 es tán representados los diagramas de las concentraciones de ozono de las fases aire y líquido en las columnas de contracorrientes y de corrientes paralelas, que indican claramente el agotamiento sistemático obtenido de este modo con el mínimo de pérdida de ozono en el escape en la parte superior de las columnas.

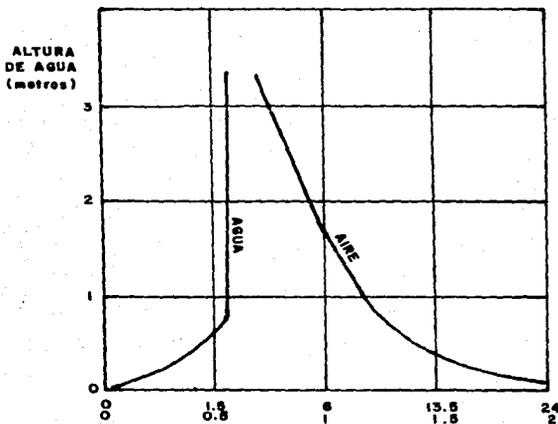
En la última cámara denominada de "desgasificación" el coeficiente de ozono aplicado es en general bastante reducido.

Cabe hacer destacar que, pese a las importantes dificultades tecnológicas que implica su comprensión, se puede recuperar una fracción considerable -



TRANSFERENCIA DEL OZONO MEDIANTE BURBUJAS A CONTRACORRIENTE. EN LAS ABCISAS DE 0 A 25 : AIRE mg/l CONCENTRACION, DE 0 A 2 : AGUA mg/l RESIDUAL

Fig. 3.14



TRANSFERENCIA DEL OZONO MEDIANTE BURBUJAS DE CORRIENTE PARALELA. EN ABCISAS, DE 0 A 24: AIRE mg/l CONCENTRACION, DE 0 A 2: AGUA mg/l RESIDUAL

Fig. 3.15

del ozono residual (extraído en la toma de aire de la última cámara de con
tacto) para utilizarlo en un tratamiento de preozonización cuyo interés pa
ra la esterilización y depuración química del agua ha sido visto anterior-
mente.

Esta recuperación reduce considerablemente la demanda de ozono en la post
ozonización final. Además, disminuye simultáneamente el costo de destruc-
ción química de este ozono residual y el perjuicio creado en la atmósfera
circundante.

CAPITULO IV

"ANALISIS COMPARATIVO ENTRE EL CLORO Y EL OZONO"

Análisis comparativo entre Cloro y Ozono.-

Cualidades del cloro.-

Acción del cloro.-

El proceso de la cloración será tan efectivo como lo sea el control que se ejerza para asegurarse de que todo el abastecimiento recibe cloro continuamente y en una cantidad proporcional al gasto, para que produzca una desinfección eficaz.

Se han obtenido muy buenos resultados con el uso del cloro, ya sea en forma de gas o de alguno de los diversos compuestos que lo contienen, como el cloruro de cal, el hipoclorito de sodio; etc. En todos los casos el cloro es el desinfectante activo; debe mencionarse que el término "cloración" se usa generalmente como sinónimo de desinfección.

Reacción en el Agua.

El cloro en el agua es un agente químico muy activo. Al agregarse cloro al agua, reacciona con gran cantidad de sustancias disueltas o suspendidas en ella, por consiguiente su poder como agente desinfectante queda disminuido o destruido.

El cloro reacciona rápidamente con el ácido sulfhídrico, lo cual da como resultado la nula desinfección; El manganeso, el hierro y los nitritos, reaccionan en forma similar con el cloro. Si se agrega la cantidad suficiente de cloro para que reaccione con estos compuestos, llamados compuestos reductores, entonces un poco más de cloro que se agregue reaccionará con cualquier materia orgánica presente; para producir compuestos organoclorados, los cuales tienen muy poca o ninguna acción desinfectante y pueden causar sabores y olores. Si se agrega cloro en cantidad suficiente para que reaccione con todas las sustancias reductoras, la materia orgánica y el amoniaco, al agregar un poco más de cloro, éste quedará como cloro residual libre disponible, el cual es un agente desinfectante muy activo.

Forma de acción sobre las bacterias.-

El cloro actúa sobre las bacterias por envenenamiento enzimático selectivo de los centros vitales de la bacteria según un proceso relativamente lento - debido a los intervalos de tiempo necesarios para la difusión del mismo en el citoplasma.

Residual libre.-

Debido a sus muchas ventajas la práctica de la cloración a residual libre se ha incrementado en los sistemas de agua potable.

Algunas de estas ventajas se enlistan a continuación:

- Su control es sumamente sencillo.
- Se puede obtener una desinfección efectiva con un período de contacto de 10 minutos.
- No se requiere variar el cloro residual con cambios en el pH - desde 6.0 hasta 8.0.
- No se requiere modificar sensiblemente el cloro residual al variar la temperatura.
- En muchas aguas se logra un notorio mejoramiento en lo concerniente a sabores y olores.

- Después de que se ha llevado a cabo una cloración a residual libre por todo un sistema de distribución, persiste y puede - mantenerse, evitando reducciones en las líneas de distribución.

La concentración del cloro residual libre, así como la proporción relativa entre los cloros residuales "libres" y "combinados", son importantes cuando se practica la cloración a residual libre.

Residual combinado.-

Pese a que el cloro activo combinado es menos activo que el cloro activo libre su velocidad de reacción lenta es favorable en ciertas situaciones, como en estanques grandes de agua cuya temperatura sea baja. Su bajo potencial de oxidación implica que su acción bactericida sea más lenta.

Este sistema se utiliza más bien como postcloración, o en la recloración; - aplicación de dosificaciones de cloro en exceso a las requeridas para desinfección, y para proporcionar un residuo permanente en el sistema de distribución.

Algunas de las características de este tipo de cloración son:

- La desinfección eficaz se obtiene en un tiempo de 60 minutos.
- Cuando el pH se incrementa, el cloro residual combinado debe - modificarse.
- El cloro residual combinado debe aumentarse al disminuir la - temperatura.
- Este tipo de cloro es muy estable.

Cualidades del ozono.-

Acción del ozono.

La utilización apropiada del ozono para el tratamiento del agua permite obtener concretamente los siguientes resultados:

- Eliminación de los sabores y olores, del hierro y del manganeso.
- Decoloración completa del agua.
- Eliminación completa de fenoles.
- Disminución sumamente sensible de las sustancias extractibles - mediante cloroformo.
- Disminución considerable del contenido de detergentes.
- Esterilización completa del agua.
- Inactivación de los virus.

No obstante, la segura obtención de estos resultados en condiciones económicamente aceptables, requiere en primer lugar, de una técnica elaborada en la aplicación del ozono al agua que se trata de rectificar y, en segundo lugar, una tecnología de producción del ozono correctamente a punto.

Reacción en el Agua.-

El ozono al introducirse al agua, posee características oxidantes especialmente enérgicas que son aprovechadas para degradar o eliminar ciertas sustancias orgánicas o minerales indeseables, como un excelente poder bactericida y virulicida.

Numerosos cuerpos, tanto minerales como orgánicos son sensibles a la acción del ozono. Entre estos cuerpos destructibles o eliminables por ozonización podemos citar los siguientes:

Contaminantes convencionales como; hierro, manganeso, proteínas y ácidos - aminados.

Compuestos responsables del deterioro del sabor, color, o del olor de las -
aguas.

Microcontaminantes orgánicos tales como; detergentes, hidrocarburos, fenoles y quizá pesticidas.

Como ya se mencionó, el ozono posee un poder bactericida y virulicida importante, con la reserva de ser aplicado en un coeficiente cuyo resultado sea la formación de un residual libre superior a un valor límite y ello durante un tiempo suficiente. Si no se cumple con los 2 últimos puntos las oxidaciones serán incompletas y el efecto esterilizante sin ser nulo puede ser exclusivamente parcial y el efecto sobre los sabores y olores será incompleto.

Forma de acción sobre las bacterias.-

El ozono actúa de forma rápida sobre éstas bajo reserva del mantenimiento de un residual después de un tiempo de contacto definido. Esto se debe a una ozonización de la masa de las proteínas bacterianas por un proceso de oxidación catalítica.

La aplicación de la ozonización en coeficientes de 0.5 a 1 g/m³, destruye también las algas y los protozoarios. Los moluscos adultos de pequeñas dimensión son relativamente resistentes, ya que sus larvas son destruidas en un 98% en tiempos más breves: la mortalidad de los demás elementos del plancton (exceptuando los quironómidos, también cloro-resistentes) es elevada. Por último, indicamos que la ozonización destruye también los productos odorígenos o saporígenos procedentes del metabolismo de los componentes del plancton.

Ventajas en las etapas del proceso de ozonización.-

- Producción de ozono.

En la práctica del tratamiento de aguas, el ozono es exclusivamente utilizado, en realidad, en forma de aire enriquecido de ozono. El aire ozonado es obtenido por emanación de una corriente alterna de baja frecuencia y a alta tensión, en el interior de un condensador (coaxial o plano).

- Almacenaje y recipientes del ozono.

El ozono es una forma activa e inestable del oxígeno, debe producirse en el sitio donde vaya a utilizarse, por lo que no es necesario almacenar el ozono; por la misma razón para el ozono no se utiliza ningún recipiente. Su aplicación es casi inmediatamente después de su producción.

- Dosificación.

El ozono tiene la ventaja en este punto del proceso, de no producir sabores posteriores a su aplicación o residuales y de que no es de gran importancia un control cuidadoso de su dosificación máxima, debido a la especial propiedad de autodestrucción del ozono.

Ventajas en las etapas del proceso de cloración.-

- Preparación.

En los sistemas de abastecimiento de agua potable donde es usado el proceso de cloración, el cloro es utilizado en forma gaseosa o como solución, ya sea solo o junto con otras sustancias químicas. Su aplicación es llevada a cabo fácilmente por los aparatos dosificadores. Al preparar estas soluciones debe tenerse en cuenta el contenido de cloro de la solución concentrada.

- Almacenaje y envases del cloro.

En condiciones normales de presión y temperatura el cloro es un gas. Sin embargo puede comprimirse fácilmente hasta que se licúa. Este hecho se aprovecha por sus evidentes ventajas, pues el cloro puede adquirirse y transportarse en recipientes de acero. Por lo general, en trabajos de abastecimiento de agua se usan recipientes de 68 ó 907 kg., pero también hay cloro disponible hasta en carros tanque de 14.5, 27 y 50 toneladas.

El cloro, como se ha mencionado con anterioridad, está presente en diversos compuestos. El hipoclorito de sodio es uno de ellos; es razonablemente estable cuando se almacena en lugares frescos y oscuros.

El hipoclorito de calcio, conocido también como cloruro de cal, también es usado. Este compuesto es relativamente inestable y debe obtenerse conforme se vaya necesitando.

- Dosificación.

Existen diferentes tipos de cloradores, pero esencialmente los cloradores consisten en diversas combinaciones de válvulas de reducción de presión. Estos aparatos bien calibrados garantizan la aplicación de la dosis adecuada de cloro al agua que se va a tratar.

- Condiciones de seguridad

El cloro gaseoso es irritante, por lo tanto debe tenerse una buena ventilación y especial cuidado de no inhalarlo, deben guardarse las máscaras de gas en un lugar accesible, cualquier fuga debe ser reparada inmediatamente para evitar daños, personales y al equipo.

Los cilindros deben de estar más fríos que los cloradores, para que el cloro gaseoso que pase por el clorador no se condense. La Temperatura del lugar donde se encuentren los cilindros, no debe ser menor a 10°C, pues de lo contrario no se vaporizará el cloro.

El manejo del cloro debe ser hecho por personal capacitado. Los envases no deben ser usados como soportes o apoyos. El equipo debe revisarse diariamente, cualquiera que sea el tipo de equipo debe mantenerse limpio y colocarse en un cuarto accesible, con ventilación adecuada y relativamente seco.

Los ensayos efectuados en gérmenes-prueba convencionales (E. Coli, Clostridium perfringens) precisan coeficientes (con una letalidad de un 99%) residuales - comparables de cloro y ozono: de 0.2 a 0.5 g/m³ en suspensiones bacterianas en laboratorio. Por el contrario, los tiempos de contacto se encuentran frecuentemente en una relación superior a 10. La esterilización mediante el cloro - hará que se efectúe el tratamiento en instalaciones de gran volumen, con objeto de garantizar un tiempo de contacto suficiente. Además, el ozono es más activo que el cloro respecto a las esporas y quistes, si se aplica cada reactivo en las condiciones óptimas. Por último en los casos accidentales de gran contaminación bacteriana, la aplicación de elevadas dosis de ozono no crearía - ningún problema de sabores y olores, mientras que la utilización masiva de compuestos clorados puede originar sabores, en presencia de restos muy ligeros de fenoles, por ejemplo. Cuando el pH y la temperatura varía, los resultados - obtenidos mediante la ozonización son más constantes que los obtenidos median- te cloración. Cabe hacer destacar que si el cloro y el peróxido de cloro ga- rantizan una acción bactericida correcta, no pueden permitir prever un trata- miento virulicida, ya que la inactivación de los virus mediante los compuestos clorados implica simultáneamente un coeficiente sumamente elevado (preferente- mente superior al "punto de quiebre") y un tiempo de contacto considerable, del orden de 48 horas.

CAPITULO V

" CONCLUSIONES "

CONCLUSIONES

La ozonización es el método mediante el cual se obtienen los mejores resultados, en cuanto a la esterilización del agua, la eliminación de los sabores y olores, la inactivación de los virus, de coloración del agua, eliminación de los fenoles, disminución de las sustancias extractibles mediante cloroformo y del contenido de detergentes. Esto es posible, utilizando una técnica elaborada de aplicación del ozono y una correcta tecnología de producción del mismo. Con esto no se quiere decir que con el uso de la cloración los resultados que se obtienen sean malos. La calidad del agua tratada con cloro es ampliamente apta para el consumo humano (ilustrando con esto que esta agua puede ser utilizada para uso industrial, doméstico, recreativo, etc.).

Sin embargo y a pesar de que el ozono posee un poder desinfectante más potente que el cloro, la cloración es el método de desinfección comúnmente utilizado en el tratamiento de aguas, debido a una razón de mucha importancia en cualquier proyecto; la economía.

Las mejores tecnologías adquiridas recientemente en la construcción de ozonizadores han disminuido considerablemente el precio del producto que antiguamente era muy superior al del cloro y que en la actualidad es del mismo orden de magnitud: a peso igual de reactivo aplicado, el precio del ozono es apenas el doble que el del cloro para instalaciones importantes.

Finalmente el ozono como desinfectante en el tratamiento de aguas es más eficaz que el cloro.

El costo del uso del cloro en la desinfección del agua es más bajo que el - del uso del ozono.

Después de haber desarrollado el presente trabajo, la recomendación es la - de utilizar la ozonización como método de desinfección del agua. En instala ciones donde las situaciones técnicas y económicas así lo permitan.

BIBLOGRAFIA

1. El tratamiento de aguas mediante el ozono.
Cyril Gomella. Societé d'Etudes pour le traitement et l'Utilisation des Eaux.
(SETUDE - PARIS) 1980.
2. El papel del ozono en el tratamiento del agua.
J.P. Legeron.
Trailigaz, France, 1979
3. Evaluación, Efectos y Solución de la Contaminación del Agua M en I Ernesto Murguía Vaca.
UNAM 1983.
4. La Cloración en los Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable.
Tesis Profesional Marco A. García D.
UNAM, 1980.
5. Manual de Tratamiento de Aguas.
Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York.
1981.